

Actinium-227 als Tracer
für Advektion und Mischung
in der Tiefsee

Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften

im Fachbereich 5
der Universität Bremen

vorgelegt von

Walter Geibert
Bremerhaven

2000

Tag des Kolloquiums:

21.12.2000

Gutachter:

1. Prof. Fütterer
2. Prof. Schlüter

Prüfer:

1. Prof. Wefer
2. Dr. Rutgers van der Loeff

**Actinium-227 als Tracer für Advektion und Mischung
in der Tiefsee**

**Actinium-227 as a Tracer for Advection and Mixing
in the Deep-Sea**

Walter Geibert

**Ber. Polarforsch. Meeresforsch. 385 (2001)
ISSN 0176 - 5027**

Walter Geibert
Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Postfach 120161
27515 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die leicht geänderte Fassung einer Dissertation, die im November 2000 dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen vorgelegt wurde.

Eine Farbversion dieses Dokumentes ist im Internet unter der Adresse <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/Publ/PhDs/WGeibert> zugänglich.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Summary	VI
1 Einleitung und Fragestellung	1
2 Verhalten und Verteilung von ^{227}Ac im Ozean	3
2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften	3
2.2 Berechnung der Freisetzung von ^{227}Ac aus Meeressedimenten	7
2.2.1 Die Verteilung des Mutternuklids ^{231}Pa in Meeressedimenten	7
2.2.2 Modell zur Freisetzung von ^{227}Ac im Vergleich zu ^{228}Ra aus dem Sediment	10
2.2.3 Vergleich der Modellergebnisse mit Daten	17
2.3 Zusammenfassende Beschreibung der Quellen und des Verhaltens von ^{227}Ac im Ozean	19
3 Material und Methoden	20
3.1 Material	20
3.1.1 Hydrographie an den Untersuchungsschwerpunkten	23
3.2 Methoden	30
3.2.1 Anreicherungsverfahren	30
3.2.2 Chemische Aufbereitung	32
3.2.3 Messung über α -Spektrometrie	35
3.2.4 Berechnung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ mit ^{231}Pa	40
3.2.5 Fehlerbetrachtung	41
3.2.5.1 Richtigkeit der Messung	42
3.2.5.2 Genauigkeit der Messung	46

3.2.6	Alternative Methoden der Messung	47
3.2.6.1	Nachweis über γ -Spektrometrie	48
3.2.6.2	Nachweis über α -Szintillation	52
4	Ergebnisse	54
4.1	Partikuläre Anteile von ^{227}Ac	54
4.2	Südostpazifik	55
4.3	Arktis	57
4.4	Drake Passage	59
4.5	Profilschnitt durch den ACC	60
4.6	Einstrom in den Weddellwirbel	65
4.7	Weddellwirbel	66
5	Diskussion	68
5.1	Erste Abschätzung der globalen Verteilung von ^{227}Ac im Ozean	68
5.2	Anwendungen von ^{227}Ac	71
5.2.1	Diapyknische Mischung, Energieflüsse und Schadstofftransport in der Tiefsee	73
5.2.2	Einträge von Nähr- und Spurenstoffen in den Antarktischen Zirkumpolarstrom	76
5.2.3	Berechnung der Auftriebsgeschwindigkeit von Tiefenwasser	78
5.2.3.1	Annahmen für die Berechnung von Auftriebsgeschwindigkeiten mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$	83
5.2.3.2	Vergleich der erhaltenen Geschwindigkeiten mit bisherigen Abschätzungen	84
5.2.3.3	Die Rolle der Auftriebsgeschwindigkeit für das Sedimentationsgeschehen	86
5.2.4	Zirkulationsmodelle	90

6	Fazit	93
	Danksagung	95
7	Literatur	97
	Anhang	108
	Abkürzungsverzeichnis	108
	Tabelle der Meßwerte	110

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Einsatz des natürlichen Radionuklids Actinium-227 (Halbwertszeit 21,77Jahre) als Tracer für Mischung und Advektion in der Tiefsee. ^{227}Ac wurde an 9 Wassersäulenprofilen α -spektrometrisch über sein Tochternuklid ^{227}Th bestimmt. Bisher existierten drei Wassersäulenprofile für ^{227}Ac , alle im Nordpazifik. Die Datenbasis konnte um Werte aus der Arktis, dem Südostpazifik, dem Antarktischen Zirkumpolarstrom und dem Weddellwirbel ergänzt werden.

Erstmals wurden Verhältnisse von partikulär gebundenem und gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule bestimmt. Es wurden maximal 1,7% des gesamten ^{227}Ac auf Partikeln gefunden. ^{227}Ac auf Partikeln ist gegenüber seinem Mutternuklid ^{231}Pa stark abgereichert. ^{227}Ac erreichte dort maximal 11% der ^{231}Pa -Aktivität. Im Südostpazifik konnten frühere Befunde bestätigt werden, wonach $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bodennah auftritt, jedoch aufgrund seines Zerfalls nicht die mittlere Wassersäule erreicht. Im Antarktischen Zirkumpolarstrom und dem Weddellwirbel konnte dagegen erstmals nachgewiesen werden, daß $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ durch Mischung und Advektion bis zur Meeresoberfläche gelangen kann.

Ein Profil aus der zentralen Arktis mit einem deutlichen oberflächennahen Schelfwassersignal (ca. 100 dpm/m³ ^{228}Ra) ergab nur einen geringen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Wert (0,17 \pm 0,07 dpm/m³). Dies spricht für einen geringen Eintrag von ^{227}Ac durch Schelfsedimente gegenüber Tiefseesedimenten. Diese Beobachtung wurde theoretisch durch ein Modell zur Freisetzungsrates von ^{227}Ac und ^{228}Ra in Sedimenten unterschiedlicher Wassertiefe bestätigt. Es ergab sich, daß Tiefseesedimente eine mindestens neunfach stärkere Quelle für ^{227}Ac sind als Schelfsedimente. Die Freisetzungsrates von ^{227}Ac und ^{228}Ra hängen stark von der Bioturbationsrate ab. Ein Vergleich der Modellergebnisse mit im Ozean gemessenen Konzentrationen ergab, daß das Modell die tatsächlichen Flüsse in der Tiefsee und auf dem Schelf gleichermaßen überschätzt. Auf der Basis der gemessenen Konzentrationen wurde die Gesamtmenge im Ozean befindlichen Actiniums auf 12,6 kg geschätzt.

Seine Quelle am Tiefseeboden, die Halbwertszeit von 21,77 Jahren und seine geringe Partikelreaktivität machen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu einem idealen Tracer für Mischung und Advektion von Wassermassen, die mit dem Tiefseeboden in Kontakt gestanden haben. Vier mögliche Anwendungen werden vorgestellt.

1. Die Bestimmung von Koeffizienten für diapkyknische Mischung in der Tiefsee.
2. Die Identifikation von Nähr- und Spurenstoffeinträgen aus Tiefenwasser in die euphotische Zone des Antarktischen Zirkumpolarstroms
3. Die simultane Bestimmung von diapkyknischer Mischung, isopyknischer Mischung und Advektion in globalen Zirkulationsmodellen
4. Die Berechnung von Auftriebsgeschwindigkeiten im Weddellwirbel

Eine exemplarische Berechnung der Auftriebsgeschwindigkeiten im östlichen Weddellwirbel mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ ergab ca. 55 m/Jahr. Dieser Wert liegt etwas höher als früher berechnete Werte für den gesamten Weddellwirbel. Um mögliche Einflüsse des Auftriebs auf die Partikelerhaltung zu untersuchen, wurden verschiedene Auftriebsraten in ein stark vereinfachendes Modell zur Partikellösung in der Wassersäule eingesetzt. Es zeigte sich, daß Auftrieb im Zusammenhang mit anderen die Lösung begünstigenden Faktoren, wie z.B. besonders kleinen Partikeln, einen Einfluß auf die Partikelerhaltung haben kann.

Insgesamt erweist sich $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ als vielversprechender Tracer für eine Reihe marin-geowissenschaftlicher Fragestellungen.

Summary

The natural radionuclide Actinium-227 (^{227}Ac , half-life 21.77 years) is presented in this work as a tracer for mixing and advection of deep-sea water masses. Vertical profiles of ^{227}Ac were determined at 9 locations via α -counting of its daughter ^{227}Th . Previous to this work, three vertical profiles of ^{227}Ac existed, all of them in the Northern Pacific. Here I report ^{227}Ac data from the Central Arctic, the Southeast Pacific, the Antarctic Circumpolar Current (ACC) and the Weddell Gyre.

For the first time, ratios of particulate and dissolved ^{227}Ac in the water column were obtained. Not more than 1.7% of ^{227}Ac were found on particles. ^{227}Ac was found to be depleted on particles with respect to its mother ^{231}Pa . Only 11% of the ^{231}Pa activity were observed on particles. In the Southeast Pacific, high $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ activities were found close to the seafloor. Due to its decay, no $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ was found far above the seafloor. This finding is in agreement with earlier results. In contrast, for the Antarctic Circumpolar Current and the Weddell Gyre $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ could be shown to reach the surface via mixing and advection.

A location in the Central Arctic with a strong influence of shelfwater near the sea surface (ca. 100 dpm/m³ ^{228}Ra) had only 0.17 ± 0.07 dpm/m³ $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$. This indicates that shelf sediments are a minor source for $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$. This observation is confirmed by model results. A model for the release of ^{227}Ac and ^{228}Ra from sediments at different water depths is applied. The results indicate that deep-sea sediments release at least nine times more ^{227}Ac than shelf sediments. The fluxes of ^{227}Ac and ^{228}Ra strongly depend on bioturbation rates. A comparison of model results and data revealed that inputs from deep-sea sediments and shelf sediments are similarly overestimated by the model. Based on water column measurements the total amount of $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ in the ocean is estimated to be 12.6 kg.

Considering its source at the deep-sea floor, its half-life of 21.77 years, and its low particle reactivity, $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ is an ideal tracer for water masses that were in contact with deep-sea sediments. Four possible applications of $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ are presented.

1. The determination of coefficients for diapycnal mixing
2. The identification of inputs of nutrients and trace elements to the euphotic zone of the ACC by deep upwelling
3. The simultaneous determination of diapycnal mixing, isopycnal mixing and

advection in global circulation models

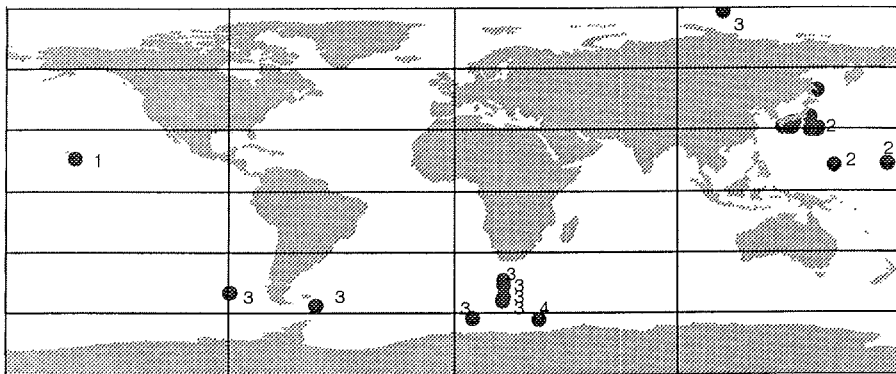
4. The determination of upwelling velocities in the Weddell Gyre

For the eastern Weddell Gyre, the upwelling velocity is calculated to be about 55 m/year. This value is somewhat higher than earlier calculations for the entire Weddell Gyre. The possible influence of upwelling on particle preservation is investigated by a simplified model for particle sedimentation. The results indicate that upwelling can enhance particle dissolution in the water column of the Weddell Gyre in conjunction with other factors, e.g. small particle sizes.

Altogether, $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ turns out to be a promising tracer for several questions in marine geosciences.

1 Einleitung und Fragestellung

Actinium (Ac) ist eines der seltensten natürlich vorkommenden Elemente überhaupt. Alle seine Isotope sind radioaktiv. Das langlebigste Isotop, der Gegenstand dieser Arbeit, weist eine Halbwertszeit von 21,77 Jahren auf. Die Seltenheit dieses Elements, seine langwierige und schwierige Bestimmung sowie die mangelnde Aussicht auf eine wirtschaftliche Nutzung haben dazu geführt, daß über seine Verteilung und seine Eigenschaften äußerst wenig bekannt ist (Pietsch 1942). Bezeichnend für diesen Sachverhalt ist die Tatsache, daß in Tabellen zur Häufigkeit der Elemente im Meerwasser der Wert für Actinium stets fehlt, während für fast alle anderen natürlichen Elemente ein Wert vorliegt.



1 ^{227}Ac in Sinkstoffallenmaterial (Anderson 1981)

2 ^{227}Ac gesamt in der Wassersäule (Nozaki 1984; Nozaki et al. 1990)

3 ^{227}Ac gelöst in der Wassersäule (diese Arbeit)

4 ^{227}Ac gelöst und in Schwebstoffen in der Wassersäule (diese Arbeit)

Ohne Nummer: Indirekte Aussagen über ^{227}Ac in der Wassersäule aus ^{227}Th (Nozaki und Yang 1987)

Abbildung 1: Karte sämtlicher bekannter Meßpunkte von ^{227}Ac im Ozean, einschließlich dieser Arbeit

Diese Lücke wäre bereits ein Anlaß, die Verteilung dieses Elements im Meerwasser zu bestimmen. Es zeichnen sich jedoch weitere Gründe ab, diesem Element in Zukunft vermehrt Beachtung zu schenken. Mit dem zunehmenden Interesse an der Tiefsee, das sowohl von der möglichen Nutzung als Rohstoffquelle und Deponie als auch von der Einsicht in die Bedeutung dieses Raumes für den globalen Energiehaushalt gespeist wird, steigt auch das Bedürfnis nach einem genaueren Einblick in die Dynamik dieses Gebietes.

Die wenigen vorliegenden Daten zur Verteilung von ^{227}Ac im Meerwasser (vgl. Abbildung 1) deuten darauf hin, daß das Nuklid hauptsächlich vom Tiefseeboden freigesetzt wird (Nozaki 1984). Sollte sich dieser Befund bestätigen lassen, so bietet dieses Nuklid eine einmalige Kombination von Merkmalen, die von keinem anderen derzeit verfügbaren Tracer geboten wird. Vor allem zwei Radiumisotope, ^{228}Ra und ^{226}Ra , wurden bisher für Fragen zur Mischung und Strömung in der Tiefsee eingesetzt (Koczy 1958, Moore 1969, Sarmiento et al. 1982, Ku und Luo 1994). ^{228}Ra bietet zwar eine vergleichbare Halbwertszeit von 5,8 Jahren, doch seine Quelle ist nicht nur das Tiefseesediment, sondern Meeressedimente allgemein, so daß stets ein lateraler Eintrag zu berücksichtigen ist (Moore 1969, Sarmiento et al. 1982). ^{226}Ra wird zwar hauptsächlich von Tiefseesedimenten freigesetzt, weist jedoch eine Halbwertszeit von 1600 Jahren auf. Damit kann es sehr weit von seiner Quelle entfernt und so gut durchmischt sein, daß vertikal nur geringe Konzentrationsgradienten auftreten. ^{227}Ac vereint mit einer Halbwertszeit von 21,77 Jahren und der Hauptquelle in der Tiefsee theoretisch die Vorteile der beiden Radiumisotope.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Eignung von ^{227}Ac als Tracer für Mischung und Advektion in der Tiefsee gezeigt werden. Vor einer Anwendung dieses vielversprechenden Tracers sind allerdings eine Reihe von Fragen bezüglich seiner Quellen, seines Verhaltens und seiner Verteilung zu klären. Im einzelnen sollen dabei folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

1. Welches geochemische Verhalten von ^{227}Ac ist im Ozean zu erwarten?
2. Wo sind die Haupteinträge von ^{227}Ac in die Wassersäule zu erwarten?
3. Wie kann das Nuklid zuverlässig und mit vertretbarem Aufwand gemessen werden?
4. Wie ist ^{227}Ac im Ozean verteilt?
5. Wofür läßt sich der neue Tracer einsetzen?

Nach den verschiedenen Arten von Fragestellungen gliedert sich die Arbeit in einen theoretischen Teil, einen methodischen Teil und einen empirischen Teil mit anschließender Diskussion. Die Ergebnisse werden in Bezug zu aktuellen Fragestellungen der Meeresforschung gesetzt. Anwendungsbeispiele demonstrieren das große Potential des neuen Tracers.

2 Verhalten und Verteilung von ^{227}Ac im Ozean

2.1 Physikalische und chemische Eigenschaften

Das Element Actinium wurde im Jahre 1899 benannt. Aus heutiger Sicht ist es unwahrscheinlich, daß der Namensgeber Debrière, der im Labor von Marie und Pierre Curie arbeitete, mit der von ihm geschilderten Abtrennungszusatzur aus Pechblende tatsächlich Actinium dargestellt hat (Alleluia et al. 1981). Die erste Darstellung des Elements muß danach eher Giesel zugeschrieben werden, der das 1902 neu entdeckte Element „Emanium“ nannte (Alleluia et al. 1981). Im Anschluß konnte, vor allem durch Hahn, bis 1911 eine fast vollständige Zerfallsreihe der kurzlebigen Tochternuklide des langlebigsten Actiniumisotops ^{227}Ac aufgestellt werden (Alleluia et al. 1981).

In Ermangelung einer wirtschaftlichen Nutzung wurde nie intensiv Forschung über die Eigenschaften von ^{227}Ac betrieben, zumal die hohe spezifische Aktivität (unter Berücksichtigung der kurzlebigen Folgeprodukte) und sein geringes Vorkommen den Umgang mit diesem Nuklid erschweren. In Pietsch (1942, S. 29) wird diese Situation folgendermaßen kommentiert: *„Wie nach seinem chem. und radioaktiven Verhalten zu erwarten ist, hat Ac selbst noch keinerlei Verwendung gefunden. Es kommt höchstens als beständige Quelle für seine als radioaktive Indikatoren geeigneten Folgeprodd. in Betracht. So könnten RdAc und AcX als α -Strahler häufig dienlich sein, [...] wenn die Spärlichkeit der Ac-Präparate und ihre geringe Konz. an Ac nicht hinderlich im Wege stünden [...]“*. Bis 1981 ist als einzige Nutzungsmöglichkeit der Einsatz in Batterien (auf Basis seiner Radioaktivität) genannt (Alleluia et al., Vorwort), und seitdem wird in der Literatur, außer der Eignung als natürlicher Tracer (Nozaki 1984), keine Anwendung dieses Elements vermerkt.

^{227}Ac gehört zur seltensten der drei natürlichen Zerfallsreihen (Abbildung 2), der Uran-235 oder ^{235}U -Reihe. ^{227}Ac mit einer Halbwertszeit (HWZ) von 21,77 Jahren entsteht durch α -Zerfall aus Protactinium-231 (^{231}Pa , HWZ 32500 Jahre), das wiederum über ein Zwischenprodukt aus ^{235}U durch α -Zerfall entsteht. ^{227}Ac zerfällt über einen β -Zerfall zu Thorium-227 (^{227}Th , HWZ 18,7 Tage). Das emittierte Elektron ist mit einer Energie von 0,05 MeV sehr energiearm und damit schwer für den Nachweis von ^{227}Ac heranzuziehen.

Die radioaktiven Zerfallsreihen natürlich vorkommender Radionuklide

nach Broecker&Peng,1982

Element	Uran-238 Zerfallsreihe					Th-232 Zerfallsreihe			U-235 Zerfallsreihe		
Uran	U-238 4.5*10 ⁹ j		U-234 248000 j						U-235 7.0*10 ⁸ j		
Protactinium		Pa-234 1.2 min								Pa-231 32500 j	
Thorium	Th-234 24.1 t		Th-230 75200 j			Th-232 1.4*10 ¹⁰ j		Th-228 1.9 j	Th-231 25.5 std		Th-227 18.7 t
Actinium							Ac-228 6.1 std			Ac-227 21.8 j	
Radium			Ra-226 1620 j			Ra-228 5.8 j		Ra-224 3.7 t			Ra-223 11.4 t
Francium											
Radon			Rn-222 3.8 t								Rn-219 3.96 s
Astat											
Polonium			Po-218 3.1 min	Po-214 0.00016 s	Po-210 138 t						Po-215 7*10 ⁻⁸ s
Wismut			Bi-214 19.7 min		Bi-210 5.0 t						
Blei			Pb-214 26.8 min	Pb-210 22.3 j	Pb-206 stabil			Pb-208 stabil			Pb-207 stabil

↓ α-Zerfall
n: -2
m: -4

↗ β-Zerfall
n: +1
m: +/-0

↓ Längere Zerfallsreihe
über Zwischenprodukte

chem.Symbol
des Elementes

↖ Masse
↘ Halbwertszeit

□ nicht partikelreaktiv
▤ wenig partikelreaktiv
▦ deutlich partikelreaktiv
▧ sehr partikelreaktiv

Abbildung 2: Die natürlichen Zerfallsreihen. ²²⁷Ac gehört zur ²³⁵U-Zerfallsreihe (rechts).

Actinium (Ordnungszahl 89) ist das erste Element in der Reihe der Actiniden, die nach ihm benannt sind. Es tritt in dreiwertiger Form in Verbindungen auf. Nach Cotton (1991) ähnelt es in vielen seiner Eigenschaften Lanthan, so z.B. im Redoxpotential

(La^{3+} und Ac^{3+} 2,62 V) und im Ionenradius (La^{3+} 106 pm, Ac^{3+} 111 pm). Nach wie vor stehen für Actinium praktisch keine Daten zur Koordination in Verbindungen und zum Verhalten in wäßrigen Lösungen zur Verfügung (Alleluia et al. 1981). Actinium ähnelt in seinem chemischen Verhalten Lanthan (Nozaki 1993, Zhang und Nozaki 1998). Neuere Untersuchungen zur Struktur der Elektronenhülle von Actinium deuten darauf hin, daß es sich doch deutlicher von Lanthan unterscheidet als bisher angenommen (Gschneidner 1995).

Von entscheidender Bedeutung für die Nutzung von ^{227}Ac als Tracer für ozeanische Zirkulation ist eine geringe Partikelreaktivität im marinen Milieu. Im geochemischen Verhalten von Actinium im Seewasser und im Sediment ist eine deutliche Analogie zu Radium bezüglich seiner Freisetzung aus Sedimenten und seiner geringen Partikelreaktivität zu erkennen. Messungen von ^{227}Ac in der Wassersäule (Nozaki 1984, Nozaki und Yang 1987) und im Sediment (Nozaki et al. 1990) zeigten, daß ^{227}Ac von Meeressedimenten freigesetzt wird. Als Maß für die Partikelreaktivität eines Elementes kann der Verteilungskoeffizient oder K_d -Wert herangezogen werden:

$$(1) \quad K_d = \frac{Ac_{part}}{Ac_{diss}}$$

Ac_{part} : partikuläre Aktivität an Actinium [dpm/g] Trockenmasse

Ac_{diss} : gelöste Aktivität an Actinium [dpm/g] Seewasser,

Nozaki (1993) konnte zeigen, daß der Verteilungskoeffizient K_d von Actinium mit $K_d \sim 2 \cdot 10^5$ (in der Wassersäule) bzw. $0,4 \cdot 10^5$ (im Sediment) etwa um Faktor 10 kleiner ist als der von Protactinium, so daß nur einige Zehntelprozent des im Ozean vorkommenden Actiniums an Partikel gebunden sein sollten. Dieser Befund wird durch niedrige partikuläre $^{227}\text{Ac}/^{231}\text{Pa}$ -Verhältnisse (<1) im zentralen Pazifik (Anderson 1981) bestätigt. Auch im Rahmen dieser Arbeit erstmals gewonnene Verhältnisse von partikulärem zu gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule stimmen damit überein (vgl. Abschnitt 4.1).

Nozaki (1984) hat die mittlere Residenzzeit von Actinium im Ozean bis zur Entfernung aus der Wassersäule auf ca. 3000 Jahre geschätzt. Anderson (1981) gibt 540-3250 Jahre als untere Grenze für die Residenzzeit von ^{227}Ac an. Vergleicht man diese Zahlen mit der relativ kurzen Halbwertszeit von ^{227}Ac (21,77 Jahre), so muß Actinium zumindest im offenen Ozean als (abgesehen vom radioaktiven Zerfall) konservatives Element eingeschätzt werden. Da ^{227}Ac im Gegensatz zu seinem Mutternuklid ^{231}Pa

eine geringe Partikelreaktivität aufweist, wird es von protactiniumhaltigen Meeresedimenten freigesetzt (Abbildung 3).

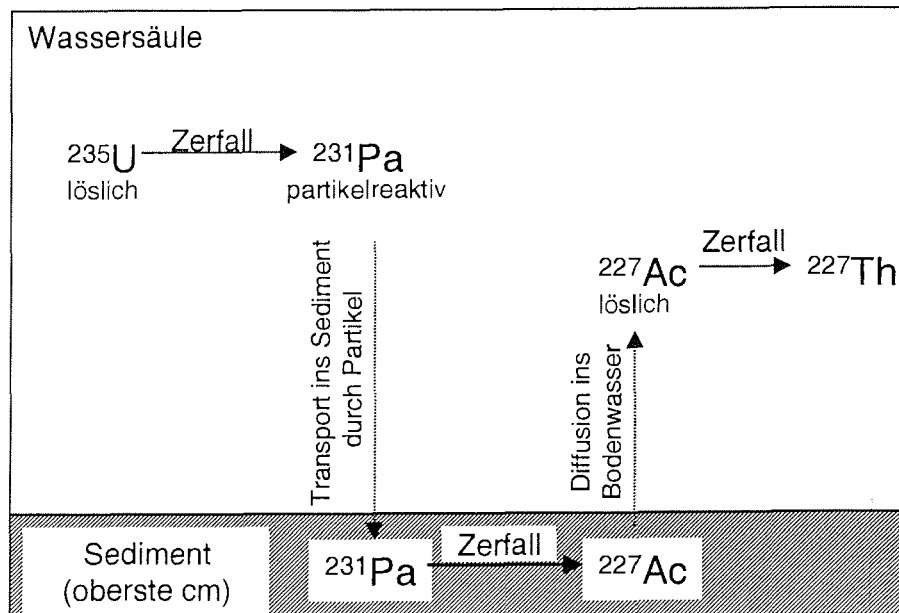


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Quelle von ^{227}Ac im Ozean

Das Verhalten von Actinium bei der Probennahme und –aufarbeitung deutet allerdings darauf hin, daß bestimmte partikuläre Phasen doch zu einer Entfernung des Nuklids aus der Wassersäule führen könnten. So wird Actinium sehr effektiv, oft besser als Protactinium, von den zur Probennahme eingesetzten MnO_2 -beschichteten Adsorbentien zurückgehalten (Reid et al. 1979) und es wird quantitativ mit $\text{Fe}(\text{OH})_3$ mitgefällt (Nozaki 1984). Diese Affinität zu Mangandioxid und Eisenhydroxid könnte, wenn z.B. ein massiver Eintrag von terrigenen Partikeln aus dem Schwankungsbereich von Grundwasser stattfindet (diese Partikel weisen oft Eisen- und Manganoxidkrusten auf), zu einer Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule führen.

2.2 Berechnung der Freisetzung von ^{227}Ac aus Meeressedimenten

Nachdem nach den publizierten Profilen von 1984 und 1987 das Tiefseesediment als Quelle für $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ nahelag, konnten Nozaki et al. (1990) zeigen, daß der Anreicherung von ^{227}Ac in der Wassersäule auch eine Abreicherung von ^{227}Ac nahe der Sedimentoberfläche entspricht. Die Konzentration von ^{227}Ac im Porenwasser nimmt zur Sedimentoberfläche hin ab, was einer Diffusion von ^{227}Ac aus dem Sediment ins Meerwasser entspricht.

Zwar ist derzeit nur ein Profil von ^{227}Ac im Sediment verfügbar (Nozaki et al. 1990), doch kann aufgrund der Verteilung seines Mutterisotops ^{231}Pa davon ausgegangen werden, daß aus dem Sediment diffundierendes Actinium die einzige Quelle für $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Ozean ist. Die Tiefenverteilung dieser Quelle ist bei der Interpretation der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte von essentieller Bedeutung, so daß im folgenden Tiefseesediment, Schelf und Kontinentalhang anhand eines modifizierten Modells von Nozaki et al. (1990), das auf einer Arbeit von Cochran und Krishnaswami (1980) basiert, genauer betrachtet werden sollen.

Da ^{227}Ac aus ^{231}Pa produziert wird, sollte die Freisetzungsrates von Ac aus dem Sediment unter anderem von der ^{231}Pa -Konzentration abhängen. Deshalb soll hier zunächst auf die steuernden Größen für die Protactinium-Verteilung im Sediment eingegangen werden.

2.2.1 Die Verteilung des Mutternuklids ^{231}Pa in Meeressedimenten

^{231}Pa im Sediment stammt aus zwei Quellen: Zum einen aus dem Anteil, der im Sediment im Gleichgewicht mit ^{235}U steht ("supported", $^{231}\text{Pa}_{\text{sup}}$), zum anderen dem Anteil, der aus ^{235}U in der Wassersäule stammt ($^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$) und aufgrund seiner Partikelreaktivität ins Sediment gelangt ist (Anderson 1981). Die Abschätzung dieser beiden Anteile ist von essentieller Bedeutung für die Nutzung von ^{227}Ac , wie im folgenden erläutert werden soll. Wäre der terrigene, also ^{231}Pa im Gleichgewicht mit ^{235}U , der dominante Anteil, so wäre dieses Nuklidpaar direkt vergleichbar mit ^{228}Ra und ^{232}Th . Damit wäre ein neuer Tracer für Mischung analog zu ^{228}Ra , jedoch mit der vierfachen Halbwertszeit gewonnen. Ist allerdings der $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ -Anteil dominant, so ist das Tiefseesediment die Hauptquelle, da die Produktion von Pa_{ex} in erster Näherung der Mächtigkeit der darüberliegenden Wassersäule entspricht (vgl. Abbildung 4). Die ^{231}Pa -Konzentrationen an der Sedimentoberfläche zeigen eine deutliche Zunahme mit der Wassertiefe (im Pazifik bis max. 4 dpm/g Sediment, im Atlantischen Sektor des

Südozeans bis max. 6,6 dpm/g). Für ^{232}Th , die Quelle von ^{228}Ra , ist keine Zunahme mit der Tiefe zu beobachten. Dies deutet darauf hin, daß ^{227}Ac im Gegensatz zu ^{228}Ra eine stärkere Quelle in der Tiefsee haben sollte.

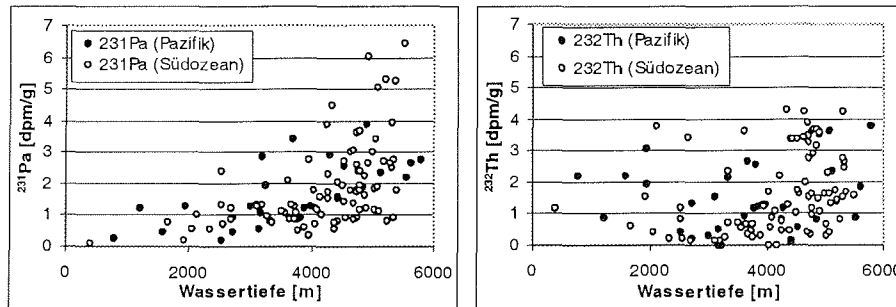


Abbildung 4: ^{231}Pa -Konzentration (links) und ^{232}Th -Konzentration (rechts) an der Sedimentoberfläche gegen die Wassertiefe. Die Daten für den Pazifik sind Lao et al. (1992) entnommen, die Daten für den Atlantischen Sektor des Südozeans Walter et al. (1997). Während ^{231}Pa mit der Wassertiefe zunimmt, ist bei ^{232}Th kein solcher Zusammenhang zu beobachten.

Weiterhin wird die ^{231}Pa -Konzentration von der Sedimentakkumulationsrate bestimmt. Bei konstanter Produktion des Nuklids in der Wassersäule führt eine höhere Akkumulationsrate zu einer Verdünnung der ^{231}Pa -Konzentration im Sediment. Den Zusammenhang illustriert Abbildung 5 (Lao et al. 1992).

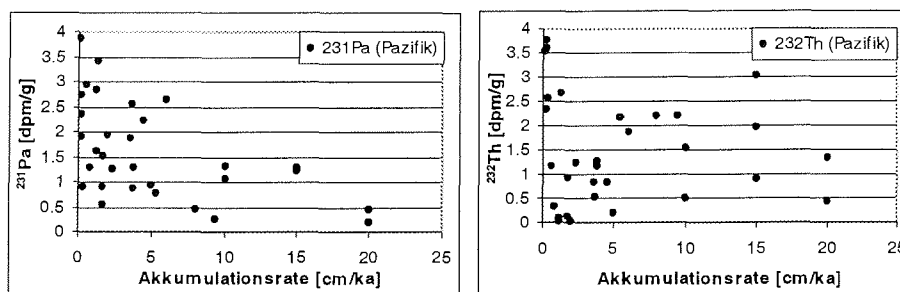


Abbildung 5: ^{231}Pa -Konzentration an der Sedimentoberfläche gegen die Akkumulationsrate (Pazifik). Die Daten sind Lao et al. (1992) entnommen. Mit höheren Akkumulationsraten nimmt die ^{231}Pa -Konzentration ab. Ein Teil dieses Zusammenhangs entsteht durch den Zusammenhang zwischen Wassertiefe und Akkumulationsrate (vgl. Abbildung 6).

Durch die geschätzte mittlere ozeanische Residenzzeit von ^{231}Pa von 150-200 Jahren ergibt sich die Tatsache, daß das Nuklid nach seiner Produktion weit im Ozean transportiert werden kann. Deshalb wird es bevorzugt in Gebieten hoher Partikelflüsse abgelagert (Anderson 1981). Hierdurch wird der Verdünnung des ^{231}Pa -Signals bei hohen Sedimentakkumulationsraten entgegengewirkt.

Zur Abschätzung der Quellstärke für ^{227}Ac kann bis zum Vorliegen von mehr Meßwerten also nur die Wassertiefe als Anhaltspunkt herangezogen werden, da die Akkumulationsrate zum Teil mit der Wassertiefe korreliert ist (Middelburg et al. 1997, vgl. auch Abbildung 6) und die Erhöhung der ^{231}Pa -Konzentration durch hohe Partikelflüsse derzeit nicht quantifizierbar ist.

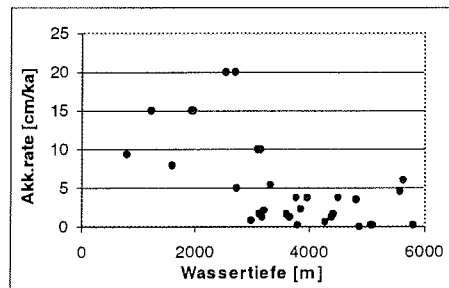


Abbildung 6: Akkumulationsrate vs. Wassertiefe im Pazifik für die in Abbildung 5 gezeigten Daten. Die Daten sind Lao et al. (1992) entnommen.

Auch Nozaki (1993) kommt zu dem Schluß, daß aufgrund der Verteilung von ^{231}Pa die dominante Quelle für ^{227}Ac in großen Wassertiefen zu finden ist. Basierend auf einer Schätzung des mittleren ^{231}Pa -Gehaltes von Tiefseesedimenten von $2,8 \pm 1,4$ dpm/g (nach Yang et al. 1986) und einer auf dem mittleren Urangehalt basierten Schätzung für Schelfsedimente von ca. 0,1 dpm/g nimmt Nozaki (1993) an, daß Tiefseesedimente eine um etwa Faktor 20 höhere Quelle für ^{227}Ac darstellen als Schelfsedimente. Dabei sind die unterschiedlichen Flächenanteile noch nicht berücksichtigt.

Wenn man weiterhin berücksichtigt, daß $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ adsorptiv an Partikel gebunden ist, wobei durch Zerfall entstehendes ^{227}Ac leichter ins Porenwasser emittiert wird, während lithogenes ^{231}Pa im Kristallgitter eingebunden ist und sein Zerfallsprodukt zu einem geringeren Anteil ins Porenwasser gelangen kann, so ist das Tiefseesediment bezüglich der ^{227}Ac -Freisetzung noch deutlich stärker einzuschätzen. Cochran und Krishnaswami (1980) kommen bei einer Untersuchung zum Verhalten von ^{226}Ra bei seiner Entstehung durch Zerfall zu dem Schluß, daß Radionuklide aus adsorptiv an der Mineraloberfläche gebundenen Mutternukliden etwa zu einem doppelt so hohen Anteil ins Porenwasser gelangen wie im Kristallgitter gebundene. Dabei wird eine mittlere Dicke der Minerale von $3,2 \mu\text{m}$ zugrundegelegt, was einer Reichweite der durch α -recoil-Effekt beschleunigten Atome von $0,09 \mu\text{m}$ gegenübersteht. Cochran und Krishnaswami (1980) kommen zu dem Ergebnis, daß ^{226}Ra aus $^{230}\text{Th}_{\text{ex}}$ zu 60-70% ins Porenwasser gelangt, während ^{226}Ra aus $^{230}\text{Th}_{\text{sup}}$ (im Kristallgitter gebunden) zu 30%

das Mineral verläßt. Für Sedimente mit geringeren Korngrößen als 3,2 µm, z.B. rote Tiefseetone, kann der Anteil beim Zerfall ins Porenwasser emittierter Atome noch höher sein. Diese Situation ist analog auf ^{227}Ac aus $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ zu übertragen, da die physikalischen Prozesse dem ^{230}Th - ^{226}Ra -Paar entsprechen. Im folgenden soll anhand eines Modells von Nozaki et al. (1990) berechnet werden, welche ^{227}Ac -Flüsse aus Schelf- bzw. Tiefseesedimenten zu erwarten sind und welche ^{228}Ra - ^{227}Ac -Verhältnisse sich daraus für die jeweiligen Quellen ergeben.

2.2.2 Modell zur Freisetzung von ^{227}Ac im Vergleich zu ^{228}Ra aus dem Sediment

^{227}Ac entsteht im Sediment durch Zerfall aus ^{231}Pa , und ein Teil des neu entstandenen ^{227}Ac gelangt ins Porenwasser. Dort befindet es sich in einem Adsorptionsgleichgewicht mit ^{227}Ac auf Partikeln, wobei wesentlich weniger ^{227}Ac in Lösung als auf Partikeln ist. Das gelöste Actinium gelangt durch molekulare Diffusion, dem Konzentrationsgradienten zur Sedimentoberfläche hin folgend, ins darüberliegende Wasser. Gleichzeitig werden Partikel mit adsorbiertem ^{227}Ac durch Bioturbation näher zur Oberfläche gebracht.

Nozaki et al. (1990) wendeten ein Modell von Cochran und Krishnaswami (1980) in vereinfachter Form zur Vorhersage von ^{227}Ac -Konzentrationen im Porenwasser an, das die oben genannten Prozesse quantitativ berücksichtigt. Dieses Modell soll im folgenden eingesetzt werden, um die zu erwartenden Flußraten von ^{227}Ac aus dem Sediment in die Wassersäule zu berechnen. Es werden jeweils für die Tiefsee und für den Kontinentalschelf erwartete Flußraten von ^{227}Ac auf der Basis des Protactiniumgehalts, der Bindung von ^{231}Pa an Partikel (Kristallgitter oder adsorptiv) sowie der Intensität der bioturbationsbedingten Mischung berechnet. Die gleiche Berechnung wird für ^{228}Ra durchgeführt, um die Unterschiede zwischen den beiden Nukliden bezüglich ihrer Quellen herauszuarbeiten. Zur Berechnung der erwarteten Aktivitätsprofile der Produktionsrate im Sediment setzten Nozaki et al. (1990) die Gleichungen (2) bis (4) ein:

$$(2) \quad A = A_0 * e^{-\alpha x} + \frac{P}{1 + K} * (1 - e^{-\alpha x})$$

A : ^{227}Ac -Aktivität im Porenwasser in [dpm*cm⁻³]

α : siehe Gleichung (3)

x : Tiefe [cm]

P : Produktionsrate ^{227}Ac [dpm*cm⁻³]

K : Verteilungskoeffizient (dimensionslos)

Gleichung (3) wurde gegenüber Nozaki et al. (1990) verändert, indem der Term $D_M + D_B$ jeweils durch $D_M + KD_B$ ersetzt wurde, da hier offenbar ein Druckfehler vorlag.

$$(3) \quad \alpha = \frac{-S(1+K) + \sqrt{S^2(1+K)^2 + 4(D_M + KD_B)(1+K)\lambda}}{2(D_M + KD_B)}$$

S : Sedimentationsrate [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]

D_M : molekularer Mischungskoeffizient [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

D_B : Partikelmischungskoeffizient (= Bioturbationsrate) [$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

λ : Zerfallskonstante ^{227}Ac [s^{-1}]

$$(4) \quad P = \frac{F \rho_s A_{Pa}}{\Phi}$$

ρ_s : Feuchtraumdichte [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

Φ : Porosität

F : Anteil von bei der Produktion ins Porenwasser emittierten ^{227}Ac -Atomen

A_{Pa} : ^{231}Pa -Aktivität im Sediment [dpm/g]

Bei dieser Berechnung werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

1. Das ganze Sedimentprofil wird als bioturbiert angenommen. Hierdurch ist die ^{231}Pa -Konzentration konstant mit der Tiefe, während sie real in Abhängigkeit von Sedimentationsrate und Bioturbationsrate mit der Tiefe abnimmt. Es kann sich durch diese Vereinfachung am realen Profil eine Überschätzung des ^{227}Ac -Flusses ergeben. Für einen Vergleich zwischen ^{228}Ra und ^{227}Ac ist diese Annahme vertretbar, da ohnehin der meiste ^{227}Ac -Fluß aus der bioturbierten Schicht, also den oberen Zentimetern des Sediments stammt, wie die errechneten Profile zeigen. Die absoluten Flüsse können hierdurch allerdings überschätzt werden (vgl. Abschnitt 5.1)
2. Im Modell von Nozaki et al. (1990) wird nicht zwischen $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ und ^{231}Pa im Gleichgewicht mit ^{235}U unterschieden. Dem wird bei der Anwendung hier durch zwei Berechnungen mit jeweils unterschiedlichem F Rechnung getragen.
3. Φ und ρ_s werden konstant mit der Tiefe angenommen.

Da die Partikelmischung durch Bioturbation eine kritische Größe für den Fluß von ^{227}Ac aus dem Sediment ist, wurden zwei Varianten des Modells mit jeweils unterschiedlichen Werten für D_B berechnet (A und B, vgl. Tabelle 1). Zur Berechnung der Actiniumverteilung im Sediment und der Freisetzung aus Tiefseesedimenten wurden für die Variablen folgende Werte eingesetzt:

Für K (^{227}Ac) wurde (nach Nozaki et al. 1990) 3000 eingesetzt, da dieser Wert dort die beste Übereinstimmung zwischen Modell und Daten ergab. Derselbe Wert wurde für ^{228}Ra nach Cochran und Krishnaswami (1980) eingesetzt. Dort wurden beim Vergleich Modell zu Daten Werte zwischen 1250 und 6000 erhalten.

Für S wurde in der Variante A der Wert von Nozaki et al. (1990) von $4,5 \text{ cm} \cdot \text{ka}^{-1}$ übernommen. Dieser Wert ist für Tiefseesedimente meistens zu hoch angesetzt und für Schelfsedimente zu niedrig. Die Sedimentationsrate nimmt im Modell nur Einfluß auf die vertikale Actiniumverteilung im Sediment (Gleichungen (2) und (3), nicht jedoch auf die Flüsse (Gleichung (4)). In der Variante B wurde nach der tiefenabhängigen Regression von Middelburg et al. (1997) für Schelfsedimente ein Wert von 398 cm/ka , für Tiefseesedimente (4000 m) ein Wert von 8 cm/ka eingesetzt. Diese Werte erscheinen etwas hoch angesetzt. Sie können die Folge einer Überrepräsentation von Sedimentkernen aus Hochakkumulationsgebieten in der Stichprobe sein. Da die berechneten Flüsse in die Wassersäule von dieser Annahme nicht betroffen sind, führt eine Überschätzung der Sedimentationsrate nicht zu Fehlern in der Einschätzung der Quellstärke, sondern nur zu einer veränderten Verteilung im Porenwasser.

D_M wurde ebenfalls von Nozaki et al. (1990) übernommen, mit $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Cochran und Krishnaswami 1980: $2 \cdot 3 \cdot 10^{-6}$). Dieser Wert tritt in seinen Auswirkungen jedoch gegenüber D_B zurück, der zwar kleiner ist, jedoch durch die Multiplikation mit K stark zum Ergebnis der Berechnung beiträgt.

D_B , die bioturbationsbedingte Mischung, ist eine kritische Größe für die berechneten Flußraten. Allgemeine Werte für ein spezifisches Milieu sind nicht zu bestimmen, da die beobachteten Werte über mehrere Größenordnungen streuen. Boudreau (1997) gibt einen Zusammenhang mit der Sedimentationsrate an. Eine Regressionsgleichung kann mit diesem Zusammenhang jedoch nur 25% der beobachteten Bioturbation erklären. Einen besseren Zusammenhang geben Middelburg et al. (1997) mit der Wassertiefe an. So können 43% der Varianz erklärt werden. Da auch dieser Zusammenhang in Anbetracht der enormen Streubreite von drei Größenordnungen bei gleicher Tiefe, keine befriedigende Voraussage von D_B erlaubt, werden mehrere Szenarien berechnet. Zum einen wird ein Wert von Nozaki et al. (1990) übernommen und gleichermaßen auf Tiefsee wie Schelf übertragen (Modell A), zum anderen wird nach der Regression von Middelburg et al. (1997) D_B in Abhängigkeit von der Tiefe separat für Schelf und Tiefsee eingesetzt (Modell B).

Für F wurde im Tiefseesediment für ^{227}Ac 0,6 angenommen, ein Wert, der von Cochran und Krishnaswami (1980) für ^{226}Ra (aus ^{230}Th) ausführlich begründet wird. Der Wert ist

analog auf ^{227}Ac zu übertragen, da dieses in der Tiefsee ebenfalls zum größten Anteil aus einer adsorptiv gebundenen Quelle, ^{231}Pa , stammt, die mit einer ähnlichen Energie zerfällt. Für ^{228}Ra wurde hier sowohl für die Tiefsee als auch für Schelfsedimente 0,3 nach Cochran und Krishnaswami (1980) eingesetzt, da es im Gegensatz zu ^{227}Ac aus einer im Kristallgitter gebundenen Quelle (^{232}Th) stammt. Feuchtraumdichte und Porenwassergehalt wurden aus Nozaki et al. (1990) übernommen, mit $\rho_s=0,3$ und $\Phi=0,85$.

Für A_{Pa} wurde im Tiefseesediment ein Wert von 2,8 dpm/g (nach Yang et al. 1986) eingesetzt. Ein Vergleich mit Abbildung 4 zeigt, daß die Konzentrationen im Südpazifik in ähnlichen Größenordnung liegen. Für $A_{^{232}\text{Th}}$ wurde ein Wert von 2 dpm/g angenommen. Dieser Wert basiert auf dem natürlichen $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ -Verhältnis von ca. 20,5 (Ivanovich und Harmon 1992) und der Annahme, daß das $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Verhältnis eins ist. Tatsächlich ist letzteres Verhältnis variabel und liegt oft zwischen eins und zwei. Die Annahme eines Verhältnisses von eins bietet den Vorteil, rechnerisch leicht nachvollziehbar zu sein ohne weit vom wahren, variablen Wert abzuweichen. Der Wert von ca. 2 dpm/g ergibt sich dann aus der ^{231}Pa -Konzentration in Schelfsedimenten, die von Nozaki (1993) mit 0,1 angegeben wird, multipliziert mit dem natürlichen $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ -Verhältnis von 20,5. Die tatsächliche ^{232}Th -Konzentration streut stark von fast 0 bis über 4 dpm/g (Abbildung 4).

Aus den Gleichungen (2) bis (5) ergeben sich die folgenden Porenwasserkonzentrationen und Flüsse aus dem Sediment:

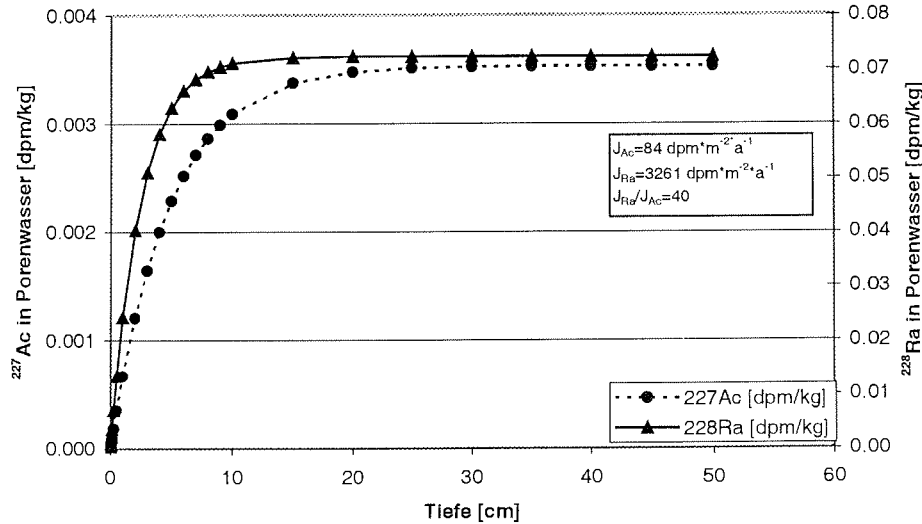


Abbildung 7: Theoretische Porenwasserprofile für ^{227}Ac und ^{228}Ra im Schelfsediment. $F_{Ac}=0,3$, $F_{Ra}=0,3$; $A_{231Pa}=0,1$ dpm/g, $A_{232Th}=2$ dpm/g; $D_B=8,7 \cdot 10^{-7}$ cm²/s; $S=398$ cm/ka. Aufgrund der längeren Halbwertszeit dringt ^{227}Ac aus etwas tieferen Sedimentschichten nach oben, erreicht aber wegen der deutlich geringeren Produktionsrate bei weitem nicht den Fluß von ^{228}Ra (unterschiedliche Skalierung der Achsen).

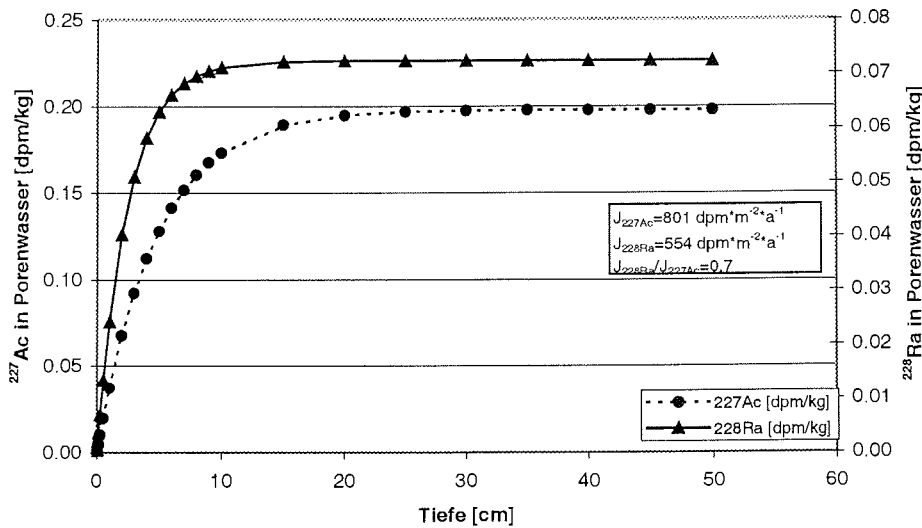


Abbildung 8: Theoretische Porenwasserprofile für ^{227}Ac und ^{228}Ra im Tiefseesediment. $F_{Ac}=0,6$, $F_{Ra}=0,3$; $A_{231Pa}=2,8$ dpm/g, $A_{232Th}=2$ dpm/g; $D_B=2,5 \cdot 10^{-8}$ cm²/s; $S=8$ cm/ka. Im Gegensatz zum Schelf übertrifft der Fluß von ^{227}Ac den Fluß von ^{228}Ra (unterschiedliche Skalierung der Achsen).

Im Vergleich zwischen den errechneten Porenwasserprofilen (Abbildung 7 und Abbildung 8) von ^{227}Ac und ^{228}Ra fällt auf, daß ^{227}Ac durch seine längere Halbwertszeit aus etwas tieferen Sedimentschichten nach oben dringt. Aufgrund der unterschiedlichen Aktivitäten von ^{227}Ac und ^{228}Ra , besonders in Schelfsedimenten, mußte für die beiden Nuklide jeweils eine eigene Skalierung gewählt werden. Die ^{227}Ac -Konzentrationen im Porenwasser von Tiefseesedimenten sind um etwa zwei Größenordnungen höher als in Schelfsedimenten.

Nach Nozaki et al. (1990) kann der jeweilige Fluß J in die Wassersäule (in $\text{dpm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) folgendermaßen berechnet werden:

$$(5) \quad J_{Ac/Ra} = P_{Ac/Ra} \Phi \sqrt{\frac{(D_M + KD_B) \lambda_{Ac/Ra}}{1 + K}}$$

$J_{Ac/Ra}$: Fluß von ^{227}Ac bzw. ^{228}Ra in die Wassersäule

Die Ergebnisse des Modells sind einschließlich der getroffenen Annahmen in Tabelle 1 wiedergegeben. Die erhaltenen Modellergebnisse zeigen eine große Empfindlichkeit für den Koeffizienten für Bioturbation, D_B . Wird zur Berechnung des Flusses von ^{227}Ac aus Schelfsedimenten die intensivere Bioturbation in dieser Region berücksichtigt (^{227}Ac Schelf B), so erhöht sich die Freisetzung im Vergleich zu ^{227}Ac Schelf A etwa um Faktor 6. Gleiches gilt für ^{228}Ra . Unabhängig von der Mischung durch Bioturbation sind auf dem Schelf sehr hohe $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}$ -Verhältnisse von 38 zu erwarten. Für die Tiefsee ergeben sich nur geringe Abweichungen zwischen den Versionen A und B, da der berechnete Koeffizient für Mischung durch Bioturbation nach Middelburg et al. (1997) nah bei dem von Nozaki et al. (1990) eingesetzten Koeffizienten liegt. In der Tiefsee sind demnach $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}$ -Verhältnisse von ca. 0,7 zu erwarten. Diese Verhältnisse zeigen, daß ^{227}Ac im Gegensatz zu ^{228}Ra hauptsächlich in der Tiefsee freigesetzt wird.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Bioturbation in Schelf- und Tiefseesedimenten (B) sind die absoluten Flüsse von ^{227}Ac in der Tiefsee neunfach höher als auf dem Schelf, während die Flüsse von ^{228}Ra in der Tiefsee sechsfach niedriger als auf dem Schelf sind.

Tabelle 1: Tabellarische Zusammenstellung der Modellannahmen und –ergebnisse. Die mit A gekennzeichneten Spalten sind unabhängig von der Wassertiefe mit $D_B=2,2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ berechnet. Bei den Spalten mit B wurde ein tiefenabhängiger Koeffizient D_B nach Middelburg et al. 1997 eingesetzt. Die Annahmen, die zu Unterschieden in den erhaltenen Produktionsraten und Flüssen aus dem Sediment führen, sind schwarz dargestellt, die übrigen grau. In eckigen Klammern sind die jeweiligen Referenzen für die Werte angegeben: [1]: Nozaki 1993 [2]: Yang et al. 1986 [3]: eigene Annahme (vgl. Text) [4]: Cochran und Krishnaswami 1980 [5]: Nozaki et al. 1990 [6]: Middelburg et al. 1997.

Größe	Zeichen	Einheit	²²⁷ Ac Schelf A	²²⁷ Ac Schelf B	²²⁷ Ac Tiefsee A	²²⁷ Ac Tiefsee B	²²⁸ Ra Schelf A	²²⁸ Ra Schelf B	²²⁸ Ra Tiefsee A	²²⁸ Ra Tiefsee B
Wassertiefe	Z	m	100	100	4000	4000	4000	100	4000	4000
Akt. des Mutternuklids	A_{Pa} (A_{Th})	dpm/g	0,1 [1]	0,1 [1]	2,8 [2]	2,8 [2]	2 [3]	2 [3]	2 [3]	2 [3]
Anteil beim Zerfall ins Porenwasser emittierter Atome	F	-	0,3 [4]	0,3 [4]	0,6 [4]	0,6 [4]	0,3 [4]	0,3 [4]	0,3 [4]	0,3 [4]
Koeffizient für Partikelmischung (durch Bioturbation)	D_B	cm^2/s	$2,2\text{E-}8$ [5]	$8,7\text{E-}7$ [6]	$2,2\text{E-}8$ [5]	$2,5\text{E-}8$ [6]		$8,7\text{E-}7$ [6]	$2,2\text{E-}8$ [5]	$2,5\text{E-}8$ [6]
Diffusionskoeffizient im Porenwasser	D_M	cm^2/s	$1,7\text{E-}6$ [5]	$1,7\text{E-}6$ [5]	$1,7\text{E-}6$ [5]	$1,7\text{E-}6$ [5]	$1,7\text{E-}8$ [5]	$1,7\text{E-}8$ [5]	$1,7\text{E-}8$ [5]	$1,7\text{E-}6$ [5]
Sedimentationsrate	S	cm/ka	4,5 [5]	300 [5]	4,5 [5]	8 [5]	4,5 [5]	300 [5]	4,5 [5]	3 [5]
Verteilungskoeffizient (zwischen part. und gel. Phase im Sediment)	K	-	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]	3000 [5]
Porosität	Φ	-	0,85 [5]	0,85 [5]	0,85 [5]	0,85 [5]	0,85 [5]	0,85 [5]	0,85 [5]	0,65 [5]
Dichte (g Trockengew. pro cm^3 Sediment naß)	ρ_s	g/cm^3	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]	0,3 [5]
Produktionsrate	P	dpm/ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)	106	106	5929	5929	2118	2118	2118	2118
Fluß aus dem Sediment	J	dpm/ ($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)	14	85	759	801	538	3261	538	554

Mögliche Einträge von ²²⁷Ac vom Kontinentalhang können aufgrund fehlender Daten zu ²³¹Pa-Konzentrationen in Sedimenten des Kontinentalhangs nicht modelliert werden. Sie könnten, insbesondere in Anbetracht der im Vergleich zu ²²⁸Ra vierfach längeren Halbwertszeit, von Bedeutung für die Verteilung von ²²⁷Ac im Ozean sein. Für ²²⁸Ra (Sarmiento et al. 1982) wurde eine Verbreitung aus dieser Quelle im Tiefenwasser über Hunderte von Kilometern angenommen. Im Vergleich mit ²²⁸Ra müssen deshalb einerseits die relativ stärkere Quelle für ²²⁸Ra in mittleren Tiefen, andererseits die längere Halbwertszeit von ²²⁷Ac gegeneinander abgewogen werden.

Die Stärke der ²²⁷Ac-Quelle im Kontinentalhang kann nur auf der Basis von ²³¹Pa-Konzentrationen abgeschätzt werden. In diesem durch starke Hangneigungen gekennzeichneten und somit dynamischen Gebiet sind jedoch nur schwer allgemeine

Aussagen zu treffen, zumal hier keine übertragbaren ^{231}Pa -Daten vorliegen. Größere Wassertiefen am Kontinentalhang lassen zwar grundsätzlich höhere ^{231}Pa -Konzentrationen erwarten. Doch sehr hohe Akkumulationsraten durch Terrigeneinträge und erhöhte Produktion an Kontinentalrändern sowie häufiger Transport der Hangsedimente über gravitative Massenbewegungen in tiefere Regionen lassen am Hang eher eine schwache Quelle vermuten. Auch die derzeit zur Verfügung stehenden Daten (vgl. folgender Abschnitt) geben noch widersprüchliche Informationen.

2.2.3 Vergleich der Modellergebnisse mit Daten

Nozaki et al. (1990) berechneten in der Tiefsee für ^{227}Ac einen Fluß von $300 \text{ dpm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ für eine Lokation im Nordwestpazifik aus 5270 m Tiefe. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie der oben berechnete und stützt die Modellergebnisse. Die dort gemessenen ^{231}Pa -Konzentrationen (ca. $1,3 \text{ dpm/g}$) sind für die Wassertiefe als niedrig einzuschätzen (vgl. Abbildung 4), so daß der etwas niedrigere ^{227}Ac -Fluß im Vergleich zum Modellergebnis hier verständlich wird.

Aus einer Übertragung von Daten aus der Wassersäule auf das Sediment bestimmte Nozaki (1984) den Fluß von ^{227}Ac im westlichen Nordpazifik auf $100 \text{ dpm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Dieser Wert ist schon beträchtlich niedriger als der oben berechnete, kann aber noch durch geringere ^{231}Pa -Gehalte im Sediment an dieser Stelle erklärt werden. Nozaki (1984) beobachtet in Übereinstimmung mit den Modellergebnissen ein $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}/^{228}\text{Th}$ -Verhältnis (^{228}Th als Vertreter für ^{228}Ra) von ca. eins.

Die berechneten Flüsse für ^{228}Ra sind in guter Übereinstimmung mit einem von Huh et al. (1987) am Sedimentprofil bestimmten Wert. Dort wurde ^{228}Th (als Stellvertreter für ^{228}Ra) im Santa Monica Basin (anoxisches Sediment, ca. 500 m Tiefe) bis in 8 cm Sedimenttiefe im Ungleichgewicht mit ^{232}Th gefunden. Daraus schätzen sie für diese Lokation den jährlichen ^{228}Ra -Fluß aus dem Sediment auf $900\text{-}1200 \text{ dpm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Andere Schätzungen (Li et al. 1980) liegen bei $6000 \pm 1000 \text{ dpm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ für die Schelfgebiete des Atlantik. Dieser Wert ist höher als die Modellergebnisse und läßt sich nach dem Modell durch höhere ^{232}Th -Gehalte oder stärkere Bioturbation erklären.

Eigene Meßwerte (Abschnitt 5.1) deuten darauf hin, daß die Modellberechnungen die Flüsse deutlich überschätzen. Da die Abweichungen für Schelf und Tiefsee etwa gleich hoch sind, verschieben sich die Relationen nicht. Für eine Diskussion der möglichen Ursachen sei auf den entsprechenden Abschnitt verwiesen.

Zwei Meßwerte stützen die Annahme, daß Schelfwasser ein schwaches ^{227}Ac -Signal mitbringt. Zum einen ein Datenpunkt von Nozaki (1993) im Izu-Ogasawara-Graben

südöstlich von Japan. Der Vergleich mit ^{228}Th -Daten an der gleichen Lokation zeigt beim ausgeprägten Konzentrationsmaximum von ^{228}Th bei ca. 300 m Tiefe (analog zu ^{228}Ra als Indikator für den Kontakt der Wassermasse mit dem Schelf) ein schwaches $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Signal (ca. 0,2 dpm/m³, $^{228}\text{Th}/^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Verhältnis ca. 18). Weiterhin zeigt ein im Rahmen dieser Arbeit neu gewonnenes Profil in der zentralen Arktis ebenfalls ein schwaches $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Signal (0,2 dpm/m³) an der Meeresoberfläche, gleichfalls an einer Stelle mit hohen ^{228}Ra -Konzentrationen (102 dpm/m³). Daraus ergibt sich ein $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}$ -Verhältnis von ca. 500, deutlich höher als das Modellergebnis. Dies kann, zumindest an dieser Lokation, als Indiz für eine stärkere Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule gewertet werden. An der Amazonasmündung (Moore 1992) wurden $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}$ -Verhältnisse von im Mittel 189 gemessen.

Nur in einer Arbeit (Nozaki und Yang 1987) sind Werte zur Fragestellung des möglichen Eintrags von ^{227}Ac durch den Kontinentalhang zu finden. Die Autoren fanden bei drei Stationen nahe Japan (größte Entfernung zum Kontinent ca. 300 km) Hinweise auf einen Eintrag von ^{227}Ac aus Sedimenten des Kontinentalhangs. Der mögliche Einfluß von Auftrieb wird von ihnen aufgrund einer fehlenden Erhöhung der ^{230}Th -Konzentrationen ausgeschlossen, ebenso der Einfluß von Advektion. Bemerkenswert ist allerdings, daß an vier Stationen in der Nähe (Entfernung zu den Lokationen mit Kontinentalhangsignal ca. 200, 500, 1200 und 1800 km; Entfernung zum Kontinent ca. 200, 200, 400 und 1200 km) kein derartiges Signal von ^{227}Ac zu beobachten ist, was unter Berücksichtigung der Rolle der isopyknischen Mischung für die Verteilung von ^{228}Ra (Sarmiento et al. 1982) und der langen Halbwertszeit von ^{227}Ac (21,77 Jahre) schwer erklärbar ist. Hier kommt entweder doch Advektion als zu berücksichtigende Größe bei der Verteilung von ^{227}Ac im Ozean in Betracht, oder die isopyknische Mischung ist dort nicht so schnell wie von Sarmiento et al. (1982) angenommen. Auf der momentanen Datenbasis läßt sich keine abschließende Aussage über die Rolle lateraler Einträge von ^{227}Ac aus dem Kontinentalhang treffen. Die Sedimentationsbedingungen am Kontinentalhang lassen jedoch insgesamt geringe $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen und damit eine dem Schelf vergleichbare Quelle vermuten. Es kann also für ^{227}Ac -Einträge vom Kontinentalhang ebenfalls angenommen werden, daß sie an ^{228}Ra erkennbar sein müssen.

2.3 Zusammenfassende Beschreibung der Quellen und des Verhaltens von ^{227}Ac im Ozean

Tiefseesedimente sind nach den Modellergebnissen eine mindestens neunfach stärkere Quelle für Actinium als Schelfsedimente. Steht Wasser lange im Kontakt mit dem Schelf, so ist zwar eine Anreicherung von ^{227}Ac bis hin zur Meßbarkeit, wie in den o.g. Beispielen möglich. Allerdings ist das ^{228}Ra -Signal dort so viel stärker, daß eventuelle Schelfwassereinträge immer an ^{228}Ra zu erkennen sein müssen, ungeachtet der längeren Halbwertszeit von ^{227}Ac . Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit den vorliegenden Daten. Ähnliches gilt für Einträge vom Kontinentalhang. Damit ist ^{227}Ac im Gegensatz zu ^{228}Ra als spezifischer Tracer für Wasser, das in Kontakt mit Tiefseesedimenten gestanden hat, zu sehen.

Einige Meßwerte von $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}$ -Verhältnissen sowie das Verhalten von ^{227}Ac im chemischen Aufbereitungsprozeß liefern Hinweise, daß in Kontinentnähe oder bei besonderer Beschaffenheit von Partikeln (Eisen- und Manganverbindungen) mit einer bevorzugten Entfernung von ^{227}Ac gegenüber ^{228}Ra aus der Wassersäule zu rechnen ist. Für den offenen Ozean wurden jedoch Verteilungskoeffizienten beobachtet, die eine signifikante Veränderung des ^{227}Ac -Signals durch partikulären Transport ausschließen.

Mit einer Halbwertszeit von 21,77 Jahren, geringer Partikelreaktivität und einer dominanten Quelle am Tiefseeboden stellt ^{227}Ac einen hervorragenden Tracer für Mischung und Zirkulation in der Tiefsee dar.

3 Material und Methoden

3.1 Material

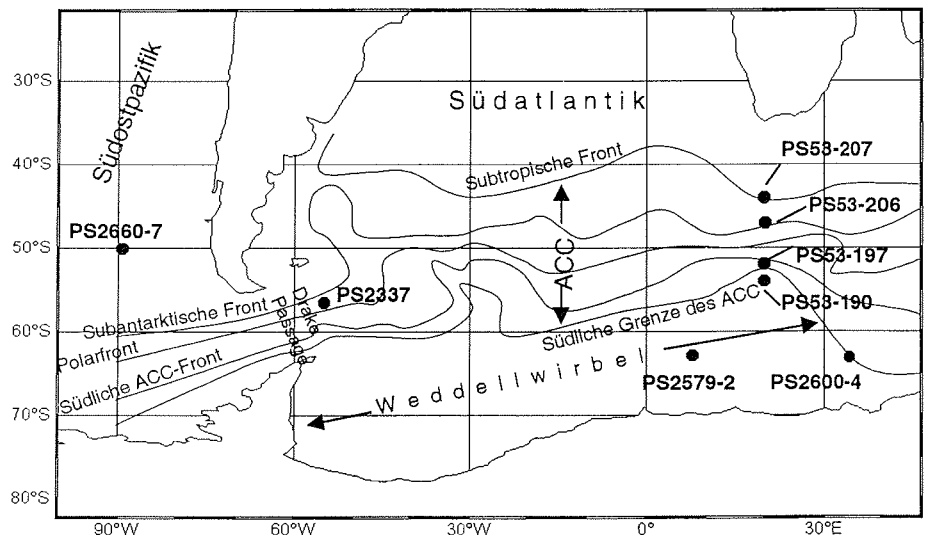


Abbildung 9: Karte der Probenlokationen auf der Südhalbkugel. Weiterhin wurde ein Profil in der zentralen Arktis bestimmt (vgl. Abbildung 1). Lager der ozeanographischen Fronten nach Orsi et. al. 1995.

Methodische Voruntersuchungen (vgl. Abschnitt 3.2.5.1) hatten ergeben, daß Actinium quantitativ in einer Reihe Proben vorliegen mußte, die bereits früher für andere Fragestellungen genommen wurden. Es handelte sich dabei um die bereits abgetrennte Bleifraktion (vgl. Abschnitt 3.2.2) aus Tiefenprofilen der Wassersäule für Radionuklide. Die jeweiligen Bearbeiter der Proben bis zu diesem Stadium sind in Tabelle 2 angegeben. Aus diesem bis Schritt 4 (Abbildung 13) bereits vorverarbeiteten Probensatz wurde eine Auswahl in Hinsicht auf verschiedene Fragestellungen getroffen. Die Breite der Palette an Fragestellungen ergibt sich daraus, daß noch sehr wenig über das Verhalten von ^{227}Ac im Ozean bekannt war. Aufgrund der aufwendigen Messung wurden nur wenige Stationen ausgewählt. Dennoch konnte die Anzahl bestehender Wassersäulenprofile von ^{227}Ac von drei auf zwölf erhöht werden.

Zum Vergleich mit früheren Profilen von Nozaki (1984) aus dem Nordpazifik wurde ein Profil im Südostpazifik, PS2660, ausgewählt. Dessen Kennzeichen war ein hoher ^{231}Pa -Gehalt der unterlagernden Tiefseesedimente und geringe Beeinflussung durch laterale Strömung (vgl. Abschnitt 4.2).

Weiterhin war die Frage nach möglichen Einträgen von ^{227}Ac aus Schelfsedimenten zu klären. Hierzu wurde ein Profil in der zentralen Arktis ausgewählt, PS2176, das sich durch eine sehr hohe ^{228}Ra -Konzentration aus Schelfwassereinträgen (Rutgers van der Loeff et al. 1995) auszeichnete.

An einem Profil, das hohe ^{227}Ac -Aktivitäten in der gelösten Phase aufwies, PS2600, wurde erstmals das Verhältnis von partikulärem zu gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule bestimmt. Ein weiteres Profil in der Drake Passage, PS2337, sollte Aufschluß über die Actiniumverteilung im ACC vor dem Einstrom in den Atlantischen Sektor geben. Ein Profilschnitt über den ACC bei 20°E (PS53-190, -197, -206, -207) wurde ausgewählt, um einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Auftrieb von Tiefenwasser in das Oberflächenwasser des ACC und ^{227}Ac zu zeigen. Schließlich wurden zum Versuch einer Bestimmung der Auftriebsrate im östlichen Weddellwirbel das Profile PS2579 und erneut Profil PS2600 herangezogen.

Gleichzeitig ergab sich aus der räumlichen Verteilung der Proben eine erhebliche Erweiterung des Kenntnisstandes über die Verteilung von ^{227}Ac im Ozean (vgl. Abbildung 1). Eine Zusammenstellung der untersuchten Lokationen, der Referenzen zur Probennahme, der Fragestellungen und früherer Bearbeiter ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Verzeichnis des verwendeten Probenmaterials

Station	Lage	Expedition	Position	Wassertiefe	Datum	Referenz	Charakteristika	Fragestellung	Probennahme
PS2660-7	Südostpazifik	ANT XII/4	50,15°S, -89,22°E	5046 m	26.03.95	Walter, mdl. Mitt.	kaum Advektion	Überprüfung früherer Befunde zur Geochemie, diapyrnische Mischung	Walter, Hölzzen, Rutgers van der Loeff
PS2176-2	zentr. Arktis	ARK VIII/3	87,46°N, 108,33°E	4396 m	25.08.91	Scholten et al. 1995; Rutgers van der Loeff et al. 1995	extremer Schelfwassereinfluß	Rolle von Schelfwasser für ^{227}Ac	Rutgers van der Loeff, Scholten, Michel
PS2337	Drake Passage	ANT X/5	56,63°S, -54,92°E	5106 m	20.09.92	Gersonde 1993	Repräsentant für ACC	Bestimmung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ox}}$ an der Oberfläche des ACC	Schlüter
PS53-190, PS53-197, PS53-206, PS53-207	ACC-Transekt	ANT XVI/3	54°S, 20°E 52°S, 20°E 47°S, 20°E 44°S, 20°E		24.04.99 01.05.99 05.05.99 07.05.99	Strass, mdl. Mitt.	starke N-S Gradienten	Beleg f. Zusammenhang zwischen Auftrieb und $^{227}\text{Ac}_{\text{ox}}$	Hanfland, Walter, Rutgers van der Loeff
PS2600-4	Weddellwirbel Einstrom	ANT XI/4	63,18°S, 34,59°E	5084 m	06.05.94	Walter et al. 1997	direkt östlich des Weddellwirbels	Quelle für $^{227}\text{Ac}_{\text{ox}}$ im Weddellwirbel, partikuläres ^{227}Ac	Friedrich, Rutgers van der Loeff
PS2579-2	Weddellwirbel	ANT XI/4	62,98°S, 7,76°E	5324 m	22.04.94	Walter et al. 1997	Weddellwirbel	Berechnung der Auftriebsgeschwindigkeit	Friedrich, Rutgers van der Loeff

3.1.1 Hydrographie an den Untersuchungsschwerpunkten

Da die bestimmten ^{227}Ac -Konzentrationen in engem Bezug zur jeweiligen Hydrographie stehen und teilweise auch zur Untersuchung ozeanographischer Fragestellungen im Antarktischen Zirkumpolarstrom (ACC) und dem Weddellwirbel herangezogen werden, wird die Hydrographie an diesen Untersuchungsschwerpunkten vor der Präsentation der Meßwerte vorgestellt.

Der ACC umschließt als durchgehende Ostströmung die Antarktis. Somit verbindet er die Weltmeere miteinander und bildet eine Schnittstelle zwischen Wassermassen unterschiedlichen Alters und Zusammensetzung. Der größte Teil des ACC wird von Zirkumpolarem Tiefenwasser (CDW) gebildet. Dieses kann wiederum nach seinem Sauerstoffgehalt (vgl. Abbildung 10) in Oberes CDW (UCDW) mit niedrigem Sauerstoffgehalt und Unteres CDW (LCDW) mit höherem Sauerstoffgehalt unterteilt werden. Im Querschnitt (Abbildung 10) sind weiterhin das Antarktische Oberflächenwasser (AASW) sowie das daraus abgeleitete Antarktische Zwischenwasser (AAIW) nördlich der Polarfront zu finden, zu erkennen an einem Salzgehaltsminimum. Bodennah, besonders in Tiefseegräben, ist das Antarktische Bodenwasser (AABW) zu finden, das sich stellenweise bis über den Äquator nach Norden erstreckt und das neben Nordatlantischem Tiefenwasser (NADW) den Hauptteil zur Ventilation des tiefen Ozeans beiträgt. Das im Nordatlantik gebildete NADW breitet sich südwärts aus und ist bis in den Atlantischen Sektor des ACC zu finden. Es vermischt sich im Bereich des ACC mit LCDW. Die Signatur des NADW, ein hoher Salzgehalt, ist im LCDW noch weit nach Osten und dann nach Süden zu verfolgen (vgl. Abbildung 10, Abbildung 11).

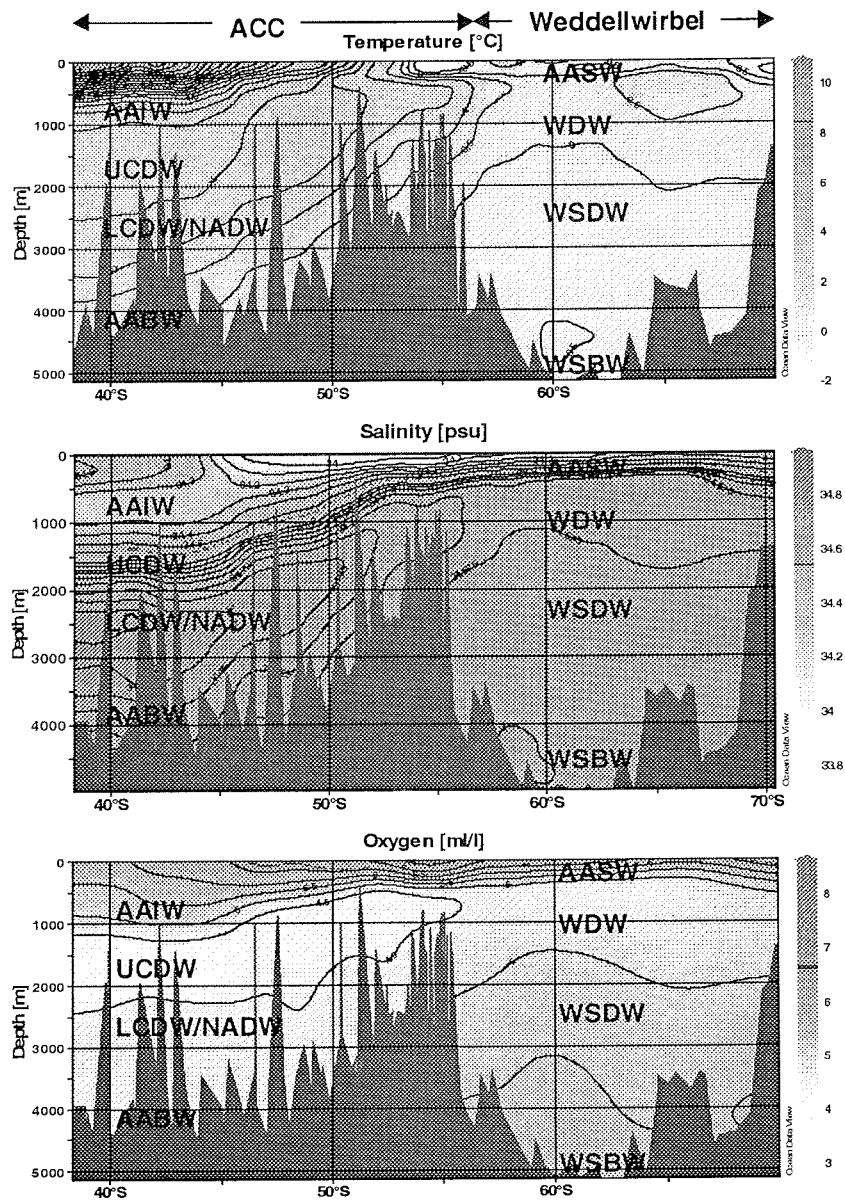


Abbildung 10: Potentielle Temperatur, Salzgehalt und gelöste Sauerstoffkonzentration auf einem Schnitt bei 0°E (Daten: Swift et al. 1999)

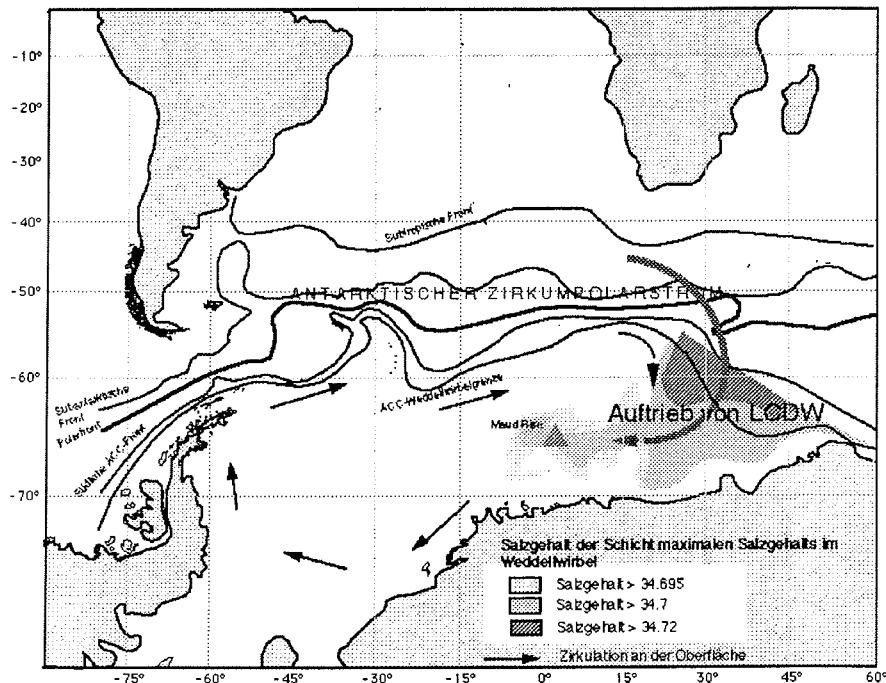


Abbildung 11: Einstrom von LCDW in den Weddellwirbel, dargestellt anhand des Salzgehalts des Salzgehaltsmaximums (nach Orsi et al. 1993).

Ein Charakteristikum des ACC sind deutlich ausgeprägte Ozeanische Fronten, Gebiete starker horizontaler Gradienten, die Wassermassen unterschiedlicher Temperatur voneinander trennen und die Gebiete besonders hoher Strömungsgeschwindigkeiten darstellen (z.B. Orsi et al. 1995; Belkin und Gordon 1996). Sie gelten als biologisch besonders produktiv, was von Satellitendaten bestätigt wird (vgl. Abbildung 37). Anhand der Fronten wird der ACC in Zonen unterteilt. Neben den Fronten wird auch der südlichen Grenze des ACC eine erhöhte Produktion zugeschrieben (Tynan 1998).

Die Fronten sind nicht stationär, sondern zeigen eine deutliche räumliche und zeitliche Dynamik. Sie mäandrieren, und häufig schnüren sich an den Mäandern geschlossene Zellen ab (Wirbel), die hinsichtlich ihrer Eigenschaften (Temperatur, Salzgehalt, Bewegungsrichtung, Vertikalbewegung, Produktivität) eine Anomalie im umgebenden Wasser darstellen. Die Fronten stellen auch im Hinblick auf die Vertikalbewegung von Wasser Regionen erhöhter Dynamik dar. Die Erfassung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs von Fronten ist ein meßtechnisches Problem, da im Rahmen von Expeditionen nur räumlich und zeitlich isolierte Daten erhoben werden können, und auch Verankerungen oder driftende Meßgeräte nur begrenzte Informationen bieten.

Satellitendaten stellen eine Alternative dar, allerdings geben sie nur die Eigenschaften der Meeresoberfläche wieder. Die Nomenklatur der Fronten ist uneinheitlich, oft werden gleiche Fronten unterschiedlich benannt. Hier werden die Definitionen von Orsi et al. (1995) zugrundegelegt. Die Kriterien zur Identifikation der Fronten sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Definitionen der Fronten nach Orsi et al. 1995

Name der Grenze /Front	Merkmale	Bezugstiefe/Isopykne
Subtropische Front	$34,6 < S < 35,0$ $10^{\circ}\text{C} < T < 12^{\circ}\text{C}$	$Z = 100\text{m}$ $Z = 100\text{m}$
Subantarktische Front	$S < 34,20$ $T > 4-5^{\circ}\text{C}$ $O_2 > 7\text{ml/l}$	$Z < 300\text{m}$, südwärts $Z = 400\text{m}$, nordwärts $Z < 200\text{m}$, südwärts
Polarfront	$T < 2^{\circ}\text{C}$ T-min $T > 2,2^{\circ}\text{C}$	$Z < 200\text{m}$, südwärts $Z > 200\text{m}$, nordwärts $Z > 800\text{m}$, nordwärts
Southern Front	$T > 1,8^{\circ}\text{C}$ $T < 0^{\circ}\text{C}$ $S > 34,73$ $O_2 < 4,2\text{ml/l}$	$Z > 500\text{m}$, nordwärts $Z < 150\text{m}$, südwärts $Z > 800\text{m}$, nordwärts $Z > 500\text{m}$, nordwärts
Nördl. ACC-Grenze	Dynamischer Höhenunterschied bei 50 db in bezug auf 1000 db $> 0,9$ dyn. meter	
Südl. ACC-Grenze	$5\text{ ml/l} < O_2 < 7\text{ ml/l}$	$\sigma_0 = 27,6$

Ein weiterer Schwerpunkt der regionalen Untersuchungen ist der Weddellwirbel. Er erstreckt sich von der Antarktischen Halbinsel bis mindestens ca. 35°E (Orsi et al. 1993). Seine Nordgrenze wird von der Weddell Front (Schröder und Fahrbach 1999) bzw. Southern ACC Boundary (Orsi et al. 1993) gebildet. Diese Front ist an einem Versatz in den Temperatur- und Salzgehaltswerten auf dem Tiefenniveau des CDW zu lokalisieren. Bei 0°E ist sie bei etwa $55^{\circ}30'\text{S}$ zu finden (Schröder und Fahrbach 1999), im Osten befindet sie sich etwas weiter nördlich (vgl. Abbildung 11).

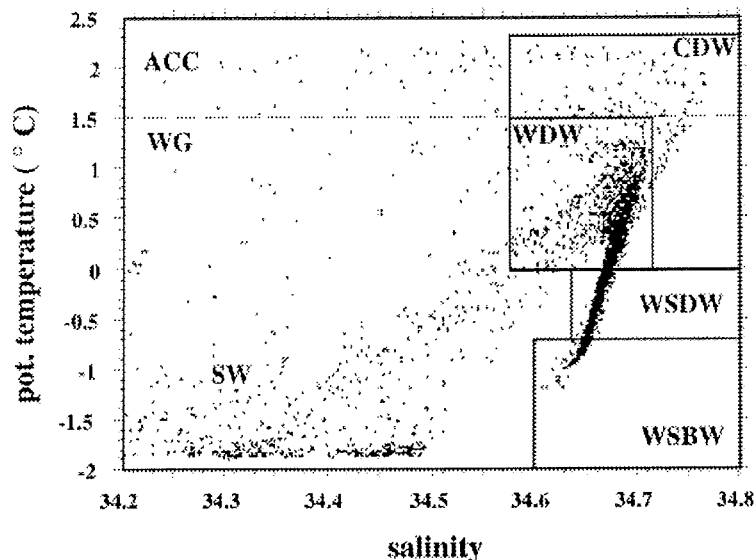


Abbildung 12: Wassermassen im Weddellwirbel. ACC = Antarctic Circumpolar Current, CDW = Circumpolar Deep Water, WDW = Warm Deep Water, WG= Weddell Gyre, WSDW = Weddell Sea Deep Water, SW =Surface Water (entspricht AASW) , WSBW =Weddell Sea Bottom Water. Aus Schröder und Fahrbach (1999).

Die dominante Wassermasse im Weddellwirbel ist das Warme Tiefenwasser (WDW, vgl. Abbildung 12), bei Whitworth und Nowlin (1987) auch als *Central Intermediate Water* bezeichnet. Die Oberfläche des Weddellwirbels wird von Antarktischem Oberflächenwasser (AASW, in Abbildung 12 als SW bezeichnet) gebildet. In größerer Tiefe ist Weddellmeer-Tiefenwasser (WSDW) zu finden, das die gleichen Charakteristika wie das AABW nördlich des Weddellwirbels aufweist und auch dessen Hauptquelle darstellt (z.B. Orsi et al. 1999). Das Bodenwasser im Weddellwirbel wird als WSBW bezeichnet.

Die Quelle für alle Wassermassen im Weddellwirbel ist das CDW, davon wiederum hauptsächlich das LCDW (Whitworth und Nowlin 1987), das sich durch Kontakt mit Atmosphäre und Schelfeis, Meereisbildung und Süßwasserzufuhr in einen salzärmeren, kälteren Teil (AASW) und einen salzreichen, kälteren Teil (WSBW / WSDW) aufteilt. WDW ist von seinen Charakteristika als CDW zu beschreiben. WSDW kann als Mischung aus WSBW und WDW gesehen werden. Alle Wassermassen des Weddellwirbels sind salzärmer als ihre Quelle (CDW), was durch den Süßwassereintrag an der Oberfläche (Niederschläge, Schelfeis, Eisberge) zu erklären ist. Gleichfalls sind alle Wassermassen im Weddellwirbel kälter als ihre Quelle, was die Bedeutung des Weddellwirbels für den Wärmeaustausch zwischen Atmosphäre und

Ozean bestätigt, da die fehlende Wärme an die Umgebung abgegeben worden sein muß.

Das Oberflächenwasser des Weddellwirbels ist durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Uhrzeigersinn gekennzeichnet. Auch in der Tiefe setzt sich das Grundmuster der Zelle fort, muß allerdings in einen östlichen und westlichen Wirbel aufgeteilt werden. Eine Darstellung der Höhenanomalie der dynamischen Höhen im Weddellmeer in Tiefen größer ca. 500 m (Orsi et al. 1993) zeigt eine zweigeteilte Struktur des Wirbels. Der von Osten erfolgende Einstrom des CDW teilt sich nahe Maud Rise auf in eine nordwärts gerichtete Komponente, die den östlichen Wirbel speist und eine südwestwärts gerichtete Komponente, die den westlichen Wirbel speist. Verschiedene Autoren, u.a. Schröder und Fahrbach (1999), unterscheiden im Weddellwirbel ein kaltes Regime im Norden und ein (relativ zum nördlichen Teil) warmes Regime im Süden.

Auf der Südostseite des Wirbels erfolgt der Haupteinstrom des CDW (Whitworth und Nowlin 1987, Orsi et al. 1993, Schröder und Fahrbach 1999, vgl. Abbildung 11). Nach Orsi et al. (1993) erhält das CDW ein erhöhtes Salzgehaltssignal durch die Beimischung von NADW. Dieses Merkmal erlaubt es, den Einstrom des Wassers im Osten zu verfolgen (Abbildung 11). Das CDW / NADW dringt bei etwa 30°E nach Süden vor. Nach Orsi et al. (1993) ist dies eine Folge der Topographie des Astrid Ridge. Der Einstrom wendet sich dann bei etwa 60°S westwärts. Dieses Eindringen des CDW ist von einem Aufstieg des Salzgehaltsmaximums von 3000 m nördlich des ACC bis 500 m nahe Maud Rise begleitet. Das bedeutet, daß die Advektion der CDW/NADW-Mischung eine ausgeprägte vertikale Komponente hat, deren Geschwindigkeit auch Gegenstand dieser Arbeit ist. Da der größte Einstrom von Wasser in den Weddellwirbel auf diesem Weg erfolgt (Schröder und Fahrbach 1999), ist regional auch hier der Hauptanteil des Auftriebs von Tiefenwassers zu sehen.

Derzeit sind nur wenige Daten zum Einstrom von CDW in den Weddellwirbel verfügbar. Das liegt einerseits an der Abgelegenheit der Region, die auf keiner vielbefahrenen Verbindung liegt, andererseits aber auch an der hohen Variabilität der Strömungsverhältnisse. Von besonderer Bedeutung sind hier mesoskalige Wirbel. Gouretski und Danilov (1994) konnten einen Wirbel verfolgen, der als warme Anomalie bis in Tiefen von mehr als 2000 m zu erkennen war und der in seiner mindestens sechsmonatigen Existenz bis weit in den Weddellwirbel vordrang. Diese Wirbel sind für die Region charakteristisch (Schröder und Fahrbach 1999). Während Wirbel üblicherweise gut über TOPEX-Satellitenbilder zu verfolgen sind, sind von diesem

Satelliten keine Daten zur Meereshöhe südlich von 66°S erhältlich. Der Satellit ERS liefert zwar Daten bis 80°S, allerdings in schlechter zeitlicher Auflösung. Solche Wirbel stellen Strukturen mit hohen Auftriebsgeschwindigkeiten dar, die im Maßstab der Wirbel gesehen Gebiete starker Advektion, in größerem Maßstab gesehen Gebiete intensiver Mischung sind. Auch Park et al. (eingereicht) finden Indizien für das Vorkommen von Wirbeln und weisen diesen eine bedeutende Rolle bei der Mischung im östlichen Weddellwirbel zu.

²²⁷Ac kann theoretisch zur genaueren Bestimmung von Auftriebsgeschwindigkeit und diapkyknischer Mischung im ACC und dem Weddellwirbel herangezogen werden. Die Vertikalbewegungen sind in diesen Regionen so schnell, daß mit einer Verbreitung von

²²⁷Ac auch in größerer Distanz vom Meeresboden gerechnet werden konnte.

3.2 Methoden

3.2.1 Anreicherungsverfahren

^{227}Ac ist im Ozean in derart geringen Konzentrationen vorhanden, daß bei derzeitigem Stand der Meßtechnik in jedem Falle eine erhebliche Anreicherung des Nuklids erfolgen muß, um es messen zu können. Hierzu sind in früheren Arbeiten verschiedene Methoden verwendet worden.

1. In einem großen Volumen Seewasser (ca. 200 l, Nozaki 1984, 1993) wird ein Eisenhydroxid-Niederschlag erzeugt, der Actinium quantitativ mitfällt. Das Actinium ist dann bereits von 200 l auf wenige ml aufkonzentriert. Dieses Verfahren ist derzeit nur für höhere Aktivitäten im Meerwasser anzuwenden, da 200 l nicht überall für einen Nachweis über γ - oder α -Spektrometrie reichen.
2. Große Volumina von Seewasser werden langsam über Braunstein-(MnO_2)-beschichtete Fasern filtriert (Moore und Reid 1973; Reid et al. 1979), um ein quantitatives Abscheiden der Radionuklide auf der Beschichtung zu erreichen. Reid et al. (1979) zeigten, daß diese Methode für eine Durchflußrate von bis zu 0,5 l/min für Actinium quantitativ ist. Solche langsamen Filtrationsgeschwindigkeiten sind in situ für Wassersäulenprofile aufgrund des hohen Zeitaufwandes ungeeignet. In Zukunft bieten empfindlichere Meßverfahren (vgl. folgender Abschnitt) die Möglichkeit, ^{227}Ac an geringeren Volumina (ca. 100 l Meerwasser, selbst bei niedrigen Aktivitäten) zu bestimmen. Dann kann dieses Anreicherungsverfahren für Wassers schöpferproben angewendet werden.
3. Nozaki und Yang (1987) und Nozaki und Horibe (1983b) betrachteten ^{227}Th als Stellvertreter für ^{227}Ac . Dies erlaubt eine vereinfachte Probennahme, da für Thorium natürliches ^{234}Th zur Bestimmung der chemischen Ausbeute zur Verfügung steht. So ist ein einfaches Ausbringen von MnO_2 -beschichteten Schwämmen ohne aktive Filtration hinreichend, um auf die ^{227}Ac -Konzentration in Meerwasser zu schließen. Die Annahme, daß die initialen ^{227}Th -Konzentrationen auf dem Schwamm der ^{227}Ac -Konzentration entsprachen, wurde durch zweijähriges Lagern eines Teils der Probe (^{227}Th wächst ins radioaktive Gleichgewicht mit ^{227}Ac) und eine erneute Messung von ^{227}Th überprüft. Diese Methode ist allerdings nur in Gebieten mit geringer Partikelkonzentration anzuwenden, da sonst eine ^{227}Th -Abreicherung durch die Partikel zu einer Unterschätzung der ^{227}Ac -Gehalte führen kann. Im offenen Ozean wird die Residenzzeit von Thorium auf etwa 30 Jahre geschätzt, so daß im Vergleich mit der

Halbwertszeit von ^{227}Th (18,7 Tage) keine Abreicherung des Nuklids gegenüber seinem Mutternuklid zu erwarten ist. Bei sehr hohen Partikelkonzentrationen, wie sie sowohl an der Meeresoberfläche als auch bodennah auftreten können, sind allerdings für ^{234}Th mit einer vergleichbaren Halbwertszeit (24,1 Tage) deutliche Abreicherungen gegenüber dem Mutternuklid bekannt (Rutgers van der Loeff et al. 1997; Bacon und Rutgers van der Loeff 1989), so daß dort ^{227}Th nicht als direkter Vertreter von ^{227}Ac aufgefaßt werden kann. Allerdings wird ^{227}Th immer einen Mindestwert für die ^{227}Ac -Konzentration angeben.

Das hier verwendete Verfahren basiert auf der Abscheidung von Actinium an MnO_2 -beschichteten Filterkerzen aus Polypropylen (Cuno Micro-Wynd, 25 cm lang, 1 μm Maschenweite oder Hytrex, 25 cm lang, 1 μm Maschenweite), die als Adsorber dienen (Moore und Reid 1973) in situ. Zur Beprobung wurden COSS-Filtrationssysteme verwendet. Hierdurch waren die wesentlich erhöhten Filtrationsgeschwindigkeiten wesentlich höher als bei der Methode von Reid et al. (1979), ca. 400 l/h gegenüber 30 l/h. Die hohen Filtrationsgeschwindigkeiten ergeben sich aus der Pumpleistung der verwendeten Pumpen, die für eine rasche Beprobung großer Seewasservolumina in situ konzipiert sind. Dem Umstand, daß bei hohen Filtrationsgeschwindigkeiten kein quantitatives Abscheiden auf der Faser erfolgt, wurde durch die Nachschaltung eines zweiten beschichteten Adsorbers begegnet (vgl. Rutgers van der Loeff und Moore 1999, S.369). Die Adsorptionseffizienz für die jeweiligen Adsorber ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen 1. und 2. Adsorber in Folge nach der Formel

$$(6) \quad E_{Ac} = 1 - \frac{A_b}{A_a}$$

E_{Ac} : Adsorptionseffizienz der Adsorber für Actinium
 A_a, A_b : Actiniumaktivität auf dem 1. bzw. 2. Adsorber

Die erhaltenen Adsorptionseffizienzen in größeren Wassertiefen sind generell recht konstant ($0,69 \pm 0,11$, vgl. Tabelle 2, Anhang). In geringen Tiefen wird eine höhere Adsorptionseffizienz beobachtet, vermutlich weil durch Plankton auf dem Vorfilter des Pumpsystems die Pumpleistung herabgesetzt wird und so verringerte Durchflußgeschwindigkeiten auftreten.

3.2.2 Chemische Aufbereitung

Zur Messung von ^{227}Ac existiert kein Standardverfahren. Da ^{227}Ac selbst nur ein schwacher Strahler ist, wurde es indirekt über ^{227}Th nachgewiesen. Hierzu mußte Thorium zunächst vollständig von Actinium getrennt werden, anschließend ein radioaktives Gleichgewicht zwischen ^{227}Ac und dem daraus nachwachsenden ^{227}Th abgewartet werden und dann ^{227}Th abgetrennt und zur α -spektrometrischen Messung vorbereitet werden. Keiner der Verarbeitungsschritte stellt an sich ein Novum dar, die Kombination der Schritte ist allerdings in dieser Form neu und auf die Proben zugeschnitten. Die hier verwendete Ablösung der MnO_2 -Beschichtung von den Adsorbern wurde zuvor von Rutgers van der Loeff und Berger (1993) für verschiedene andere Radionuklide geschildert. Die Trennung von Actinium und Thorium über Ionenchromatographie beruht auf der Methodik von Anderson und Fleer (1982). Ein vergleichbares Verfahren zur α -spektrometrischen Messung wurde von Mangini und Sonntag (1977) eingesetzt, um ^{231}Pa über ^{227}Th zu messen.

Die Numerierung der im folgenden beschriebenen Arbeitsschritte zur chemischen Aufarbeitung nimmt Bezug auf Abbildung 13. Das MnO_2 der Filterkerzen mit dem Actinium sowie Radium (Ra), Polonium (Po), Blei (Pb), Protactinium (Pa) und Thorium (Th) wurde zunächst chemisch von der Filterkerze entfernt und in Lösung überführt (Schritt 1). Hierzu wurden die Filterkerzen zuerst mit etwa 1 l einer Mischung aus 0,07 n Salpetersäure, 0,02 n Hydroxylammoniumchlorid und 0,01 n Flußsäure durchspült (Rutgers van der Loeff und Berger 1993, Walter et al. 1997, Rutgers van der Loeff und Moore 1999), wobei die Lösung für ca. 1 h durch die Filterkerze rezirkuliert wurde. Der Überstand wurde abgegossen, Schritt 1 wiederholt, allerdings ohne Flußsäure, und der Überstand mit dem der ersten Extraktion vereinigt. Anschließend wurde mit H_2O dest. erneut nachgespült und die nun erhaltene Lösung ebenfalls mit den früher erhaltenen Überständen vereinigt. Gestützt durch ein ähnliches Verfahren bei Reid et al. (1979) wurde angenommen, daß Actinium vollständig in Lösung übergegangen war. Anschließend wurde 1 ml FeCl_3 -Lösung (50 mg/ml in 0,1 n HCl) zugegeben und der pH-Wert der Lösung durch Zugabe von NH_4OH (25%) auf 8,5 eingestellt (Schritt 2). Dabei bildet sich ein Eisenhydroxid-Niederschlag, der die meisten Radionuklide, darunter auch Actinium, mitfällt.

Eine Ausnahme bildet Radium, das nur schwach von Eisenhydroxidniederschlag gebunden wird. Dieses Verhalten könnte auch unter natürlichen Bedingungen, z.B. im Grundwasser, eine (bisher noch nicht nachgewiesene) unterschiedliche Verteilung von Radium und Actinium erklären. Da die quantitative Fällung von ^{227}Ac durch $\text{Fe}(\text{OH})_3$

eine Voraussetzung für die hier verwendete Methode ist, wurde sie gesondert überprüft (Abschnitt 3.2.5.1). Nachdem der Eisenniederschlag vom Überstand getrennt und gewaschen war, wurde er mit HCl conc. aufgelöst und in 9 n HCl überführt.

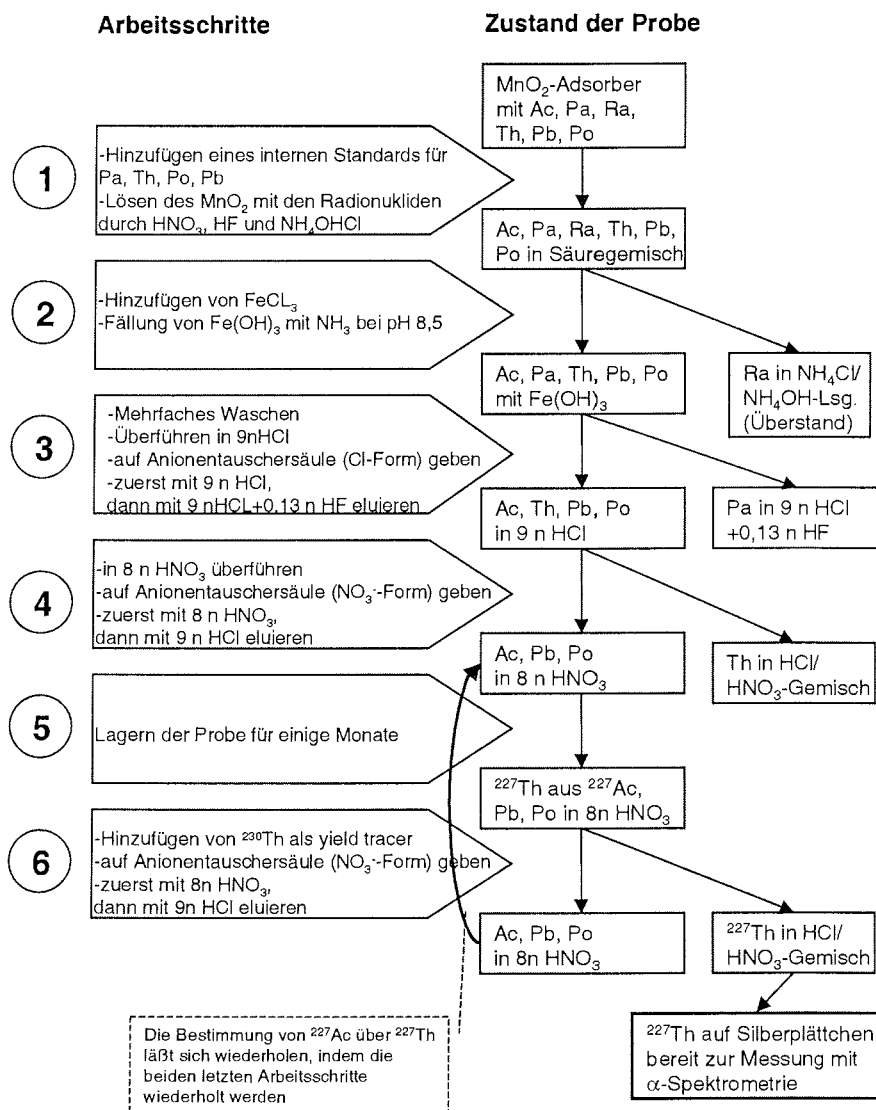


Abbildung 13: Flußdiagramm zur chemischen Separation von Ac und Th

Die chemische Trennung der Actiniden wurde über ein ionenchromatographisches Verfahren durchgeführt. Dabei wird ein Radionuklidgemisch in stark saurer Lösung über einen Anionentauscher (hier: BioRad AG1-X8) gegeben. Die Radionuklide werden je nach Normalität und Art der Säure selektiv vom Ionentauscherharz gebunden und können so nacheinander eluiert werden. Das hier verwendete Verfahren basiert auf der Methodik von Anderson und Fleer (1982). Neuere Übersichten sind in Rutgers van der Loeff und Moore (1999) und Alhassanieh et al. (1999) zu finden. Das hier verwendete Verfahren wird im Flußdiagramm (Abbildung 13) skizziert.

Da ^{227}Ac nicht direkt gemessen werden kann, muß es über das aus ihm nachwachsende ^{227}Th nachgewiesen werden. Da die Proben außerdem auf ^{230}Th untersucht werden sollten und zu diesem Zweck künstliches ^{229}Th zur Überprüfung der chemischen Ausbeute der Prozedur zugesetzt wurde, welches mit den Zerfällen von ^{227}Th interferiert, mußte zunächst alles Thorium aus der Probe entfernt werden. In Schritt 3 wurde mit einer mit 9 n Salzsäure konditionierten Ionentauschersäule das Eisen von der Fällung aus der Probe entfernt. Die jeweiligen Eluate wurden in mit heißer Salpetersäure gereinigten PTFE-Bechern aufgefangen und weiterverarbeitet. Mit 9 n Salzsäure passieren sowohl Th als auch Actinium das Harz ungehindert (Nozaki 1993; Alhassanieh et al. 1999). Dann wurde mit 9 n HCl+ 0,13 n HF Protactinium eluiert. Anschließend wurde das Eluat (etwa 50 ml) mit Actinium und Thorium unter Infrarotlicht fast bis zur Trockne eingedampft und in 8 n HNO_3 aufgelöst. Dieses Eindampfen wurde dreimal wiederholt, um eventuelle Chloridreste auszutreiben. Dann wurde die Probe in etwa 5 ml 8 n HNO_3 überführt. Nun wurde die Lösung auf eine mit 8 n HNO_3 konditionierte Ionentauschersäule gegeben (Schritt 4). Dabei passiert Actinium die Säule ungehindert (Alhassanieh et al. 1999), während Th zurückgehalten wird und nachfolgend mit 9 n HCl eluiert wird. Die jetzt in 8 n HNO_3 vorliegende Actinium-Fraktion (die auch noch Blei enthielt) wurde mehrere Monate bis Jahre gelagert (Schritt 5), so daß ^{227}Th ein radioaktives Gleichgewicht mit ^{227}Ac erreichen konnte. Nach Ablauf mehrerer Halbwertszeiten von ^{227}Th (18,7 Tage) entspricht die ^{227}Th -Aktivität der von ^{227}Ac .

Dann muß für eine Bestimmung der ^{227}Th -Aktivität erneut eine Trennung von Actinium und Thorium erfolgen. Dabei können Verluste bei der Probenaufbereitung während der nachfolgenden Schritte mit einem anderen Thoriumisotop überprüft werden. Hierzu wurden etwa 1,5 dpm ^{230}Th in 100 µl 8 n Salpetersäure zugegeben (Schritt 6), welches aufgrund der vorher in Schritt 3 durchgeführten Trennung nicht mehr in der Probe vorlag. Anschließend konnte (analog zur Trennung von Actinium und Thorium weiter oben) Thorium separiert werden. Dabei geht das Actinium nicht verloren, sondern kann

wieder in 8 n HNO₃ gelagert werden, um eine spätere Überprüfung des Meßwertes zu ermöglichen. Das Thorium wird elektrolytisch auf Silberplättchen abgeschieden (Anderson und Fleer 1982) und ist damit bereit zur Messung im α -Spektrometer.

3.2.3 Messung über α -Spektrometrie

Die Messung von ^{227}Th erfolgte über den Nachweis von für dieses Nuklid charakteristischer α -Strahlung (vgl. Mangini und Sonntag 1977; Nozaki 1983a, 1993). Ein typisches ^{227}Th -Spektrum zeigt Abbildung 14. Diese Art der Messung erfordert eine Vielzahl von Korrekturen, die hier in der Reihenfolge ihrer Durchführung vorgestellt werden.

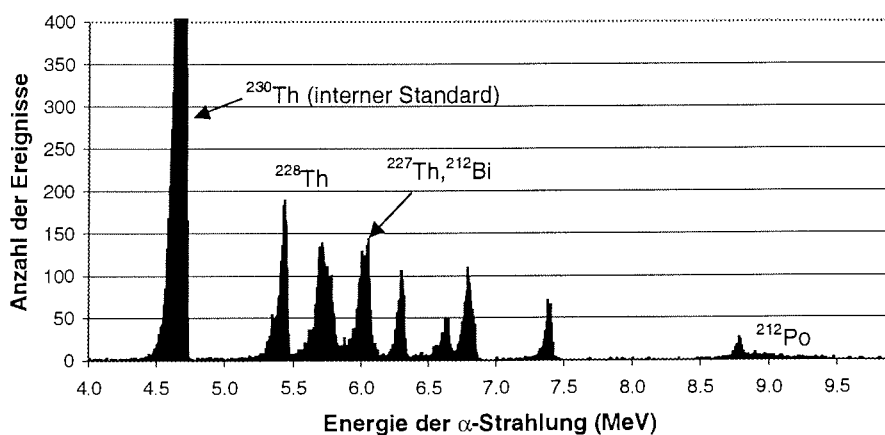


Abbildung 14: Typisches α -Spektrum von ^{227}Th mit den begleitenden Nukliden. ^{230}Th wurde zur Bestimmung der Ausbeute zugegeben.

Die benutzten Detektoren (Silizium-Halbleiterdetektoren mit 450 mm² aktiver Oberfläche, Auflösung ca. 20 keV) registrieren auch ohne Probe einen gewissen Hintergrundwert an Strahlung, der von den Zerfällen aus der Probe abgezogen werden muß. Der Hintergrundwert ist detektor- und energiebereichsspezifisch. Er wurde durch mehrwöchige Messungen mit dem jeweiligen Detektor ohne Probe bestimmt und direkt von den Meßwerten abgezogen. Problematisch ist hierbei eine mögliche Veränderung der Hintergründe während der Messung durch Zerfallsprodukte der Probe. Diesem Effekt wurde durch mehrfache Messung der Hintergrundwerte Rechnung getragen. Da die mögliche Veränderung im Energiebereich von ^{227}Th (6 MeV) durch Wismut-212 (^{212}Bi , ein Zwischenprodukt der ^{232}Th -Reihe) erfolgt, diese Zerfälle jedoch über ein gesondertes Verfahren (s.u.) berücksichtigt werden, wurde nur der um den Anteil von ^{212}Bi bereinigte Hintergrundwert abgezogen. Diese Korrektur überschritt für die Proben

von gelöstem Actinium im ersten Adsorber in Folge nie 10% und trug somit nicht viel zum Gesamtfehler bei. Für den 2. Adsorber in Folge sowie bei partikulären Proben betrug sie bis zu 33 bzw. 54%.

^{227}Th zerfällt bei verschiedenen Energien, wovon für die Messung nur sechs in Frage kommen (Tabelle 4), da die übrigen zu schwach oder von Zerfällen anderer Nuklide überlagert sind. Von den gesamten gemessenen Zerfällen von ^{227}Th werden so nur 54,55% (Summe der peaks zwischen 6,038 MeV und 5,9099 MeV nach der ENSDF-Datenbank *Evaluated Nuclear Structure and Decay Data*) für die Berechnung der Aktivität herangezogen.

Tabelle 4: Charakteristische Energien der von ^{227}Th emittierten α -Strahlung und die zugehörigen Intensitäten nach der ENSDF-Datenbank (Evaluated Nuclear Structure and Decay Data)

Energie [keV]	6038	6008,8	5977,7	5959,7	5916	5909,9	Summe
Intensität [%]	24,2	2,9	23,5	3,0	0,775	0,174	

Im gleichen Energiebereich wie die 54,55% ^{227}Th -Zerfälle zerfällt auch ^{212}Bi zu ^{208}Tl (vgl. Abbildung 15). Diese Zerfälle müssen von den in der Region um 6 MeV beobachteten ^{227}Th -Zerfällen abgezogen werden. Da ^{212}Bi das Mutternuklid von ^{212}Po (8,9 MeV) ist, kann über die Aktivität von ^{212}Po auf die Anzahl der Zerfälle von ^{212}Bi rückgeschlossen werden. ^{212}Bi zerfällt zu 64% (Gleichung (7)) über β -Zerfall zu ^{212}Po , die übrigen Zerfälle (36% der Gesamtaktivität von ^{212}Bi , Gleichung (8)) sind die bei 6 MeV beobachteten Alphazerfälle, so daß 56,25% der ^{212}Po -Aktivität die erwartete Aktivität von ^{212}Bi im Energiebereich um 6 MeV ergeben (Gleichung (9), vgl. Mangini und Sonntag 1977).

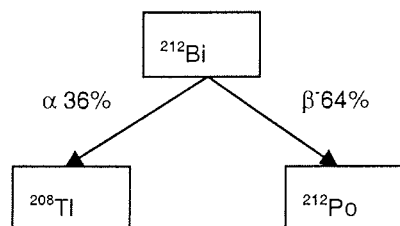


Abbildung 15: Zerfallsschema von ^{212}Bi

$$(7) \quad A_{\text{tot } 212\text{Bi}} = \frac{A_{212\text{Po}}}{0,64}$$

$$(8) \quad A_{\alpha 212\text{Bi}} = A_{\text{tot } 212\text{Bi}} * 0,36$$

$$(9) \quad A_{\alpha 212\text{Bi}} = \frac{A_{212\text{Po}}}{0,64} * 0,36 = 0,5625 * A_{212\text{Po}}$$

A_{tot} : Gesamtaktivität, α und β

A_{α} : α -Aktivität

Diese 56,25% der ^{212}Po -Zerfälle werden also von den in der Region um 6 MeV beobachteten Zerfällen abgezogen, um nur die ^{227}Th -Zerfälle zu berücksichtigen. Diese Korrektur kann bei Proben mit sehr geringer ^{227}Th -Aktivität erheblich zum Zählfehler beitragen.

Um chemische Verluste während der Aufarbeitung des ^{227}Th zu quantifizieren, wurde vor der letzten Trennung von ^{227}Ac und ^{227}Th ^{230}Th zur Bestimmung der chemischen Ausbeute der Prozedur zugegeben. Die Verluste an ^{230}Th sind gleich den Verlusten an ^{227}Th , da sich ein isotopisches Gleichgewicht einstellt. Weiterhin muß beachtet werden, daß die Detektoren nur etwa 30% der aufgetretenen Zerfälle registrieren. Diese Detektoreffizienz ist detektorspezifisch. Da davon ausgegangen werden kann, daß die Detektoreffizienz nicht energieabhängig, also für ^{230}Th und ^{227}Th gleich ist, kann auch hier eine Gleichsetzung der beiden Nuklide durchgeführt werden, so daß sich ein integrierter Wert für die Gesamtverluste während der chemischen Aufarbeitung und der Messung aus dem Verhältnis von gemessener und zugegebener Aktivität des Nuklids zur Bestimmung der Ausbeute (^{230}Th) berechnen läßt. Eine Division der gemessenen ^{227}Th -Aktivität durch diesen Wert ergibt einen ausbeutekorrigierten Wert für die ^{227}Th -Aktivität.

Dabei ist noch nicht berücksichtigt, daß in der Region um 6 MeV nur 54,55% des ^{227}Th zerfallen. Deshalb muß, um die Gesamtaktivität dieses Nuklids zu erhalten, die ausbeutekorrigierte Aktivität durch 0,5455 dividiert werden (nach Mangini und Sonntag 1977: 0,5384). Der gegenüber Mangini und Sonntag (1977) leicht veränderte Wert ist durch neuere Messungen zur Intensität der einzelnen Linien zu erklären (Tabelle 4).

Aufgrund der kurzen Halbwertszeit von ^{227}Th (18,7 Tage) muß auch der Zerfall des Nuklids seit der letzten Trennung von ^{227}Ac sowie während der Messung selbst berücksichtigt werden. Da die Messungen meist zwischen fünf und 20 Tagen dauern, ist die Aktivität der Probe zum Ende der Messung teilweise um über die Hälfte niedriger als zu Beginn. Wird einfach die Mitte des Meßintervalls gewählt, um auf die Aktivität zum Zeitpunkt der letzten ^{227}Ac - ^{227}Th -Trennung zurückzurechnen, so ergibt sich durch den exponentiellen Abfall der Aktivität während der Messung eine Überschätzung der Aktivität zum Zeitpunkt der Trennung. Aus diesem Grund muß auch der Zerfall während der Messung in die Berechnung mit einbezogen werden. Die hierbei verwendeten Variablenbezeichnungen sind in der folgenden Abbildung wiedergegeben.

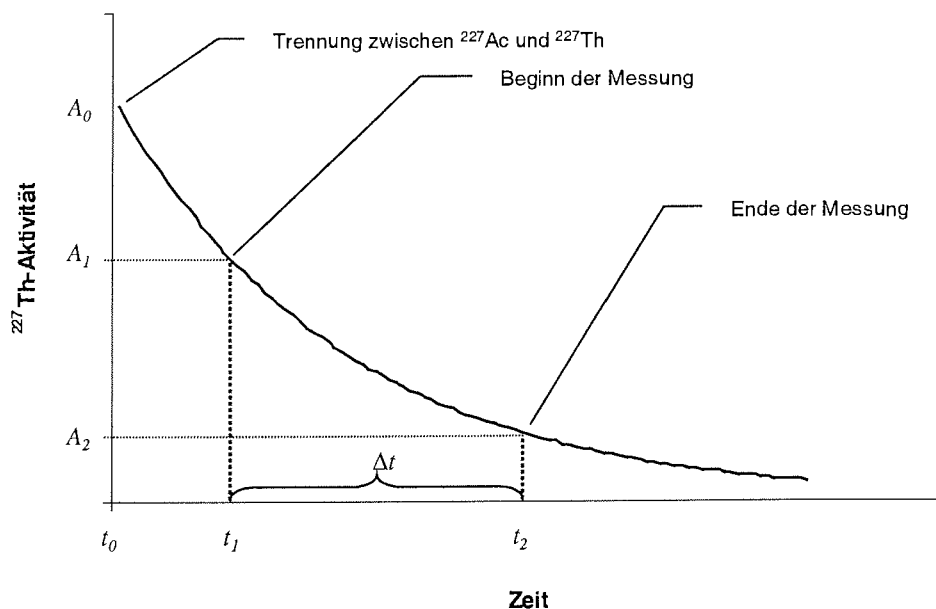


Abbildung 16: Aktivitätsverlauf während der Messung von ^{227}Th mit den in den Gleichungen verwendeten Variablenbezeichnungen

Die Aktivität an ^{227}Th zum Zeitpunkt der letzten Trennung von ^{227}Ac (A_0 , vgl. Abbildung 16) kann aus dem Integral T der gezählten Ereignisse während des Messintervalls Δt (Gleichung 12) berechnet werden. In einem Zwischenschritt wird A_1 berechnet, um hieraus auf die Aktivität A_0 zurückzurechnen.

$$(10) \quad T = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{-\lambda_{227} t} dt$$

$$(11) \quad T = A_1 \frac{1 - e^{-\lambda_{227Th} \Delta t}}{\lambda_{227Th}}$$

$$(12) \quad A_1 = T * \frac{\lambda_{227Th}}{(1 - e^{-\lambda_{227Th} \Delta t})}$$

Über Gleichung (13) ist schließlich aus der Aktivität zu Beginn der Messung die Berechnung der Aktivität zum Zeitpunkt der Trennung von ^{227}Ac (A_0) möglich:

$$(13) \quad A_0 = A_1 * e^{-\lambda_{227Th} (t_0 - t_1)}$$

Lagerte die Probe vor der Trennung für einige Monate, so hat sich ein Gleichgewicht zwischen ^{227}Th und ^{227}Ac eingestellt und die berechnete Aktivität A_0 von ^{227}Th ist gleich der Aktivität von ^{227}Ac zu diesem Zeitpunkt. Andernfalls muß das unvollständige Nachwachsen des Tochternuklids berücksichtigt werden:

$$(14) \quad A_{227Ac} = \frac{A_0}{1 - e^{-\lambda_{227Th} (t_0 - t_1)}}$$

A_{227Ac} : ^{227}Ac -Aktivität zum Zeitpunkt der vorletzten Trennung

t_0 : Zeitpunkt der letzten Trennung

t_1 : Zeitpunkt der vorletzten Trennung

Schließlich muß noch der Zerfall von ^{227}Ac seit der Probennahme berücksichtigt werden:

$$(15) \quad A_{227Ac_0} = A_{227Ac} * e^{-\lambda_{227Ac} (t_2 - t_1)}$$

A_{227Ac_0} : ^{227}Ac -Aktivität zum Zeitpunkt der Probennahme

t_2 : Zeitpunkt der Probennahme

Anschließend kann mit den berechneten Aktivitäten für die beiden Adsorber in Folge die jeweilige Adsorptionseffizienz für Actinium bestimmt werden (Gleichung 6). Der Wert für die erste Filterkerze wird daraufhin durch die bestimmte Adsorptionseffizienz dividiert. Anschließend wird der Meßwert auf das über einen bei der Probennahme vorgeschalteten Durchflußmesser bestimmte Probenvolumen bezogen. Damit ist die Actiniumkonzentration des Meerwassers zum Probennahmezeitpunkt bestimmt.

3.2.4 Berechnung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ mit ^{231}Pa

Nachdem die ^{227}Ac -Werte über α -Spektrometrie erhalten wurden, kann der Anteil von ^{227}Ac , der ein Gleichgewicht mit ^{231}Pa übersteigt, über Subtraktion der zugehörigen ^{231}Pa -Aktivitäten berechnet werden (Gleichung (16)). Ein Teil des ^{227}Ac steht im Gleichgewicht mit dem ^{231}Pa in der Wassersäule. Für Berechnungen zur Mischung und Zirkulation soll aber nur der Anteil, der aus dem Tiefseesediment stammt, berücksichtigt werden. Dieser Anteil wird $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ genannt (von excess ^{227}Ac).

$$(16) \quad ^{227}\text{Ac}_{\text{ex}} = ^{227}\text{Ac} - ^{231}\text{Pa}$$

Die unpublizierten Werte für ^{231}Pa wurden teilweise von Walter (Stationen PS2660, PS2337, PS2579 und PS2600) und teilweise von Scholten (zentr. Arktis) erhalten. Referenzen sind in Tabelle 2 gegeben.

Für den Profilschnitt über den ACC wurde ^{231}Pa nicht gemessen. Dort wurden auf der Basis benachbarter Stationen und von Messungen der ^{231}Pa -Konzentration an der Meeresoberfläche (Walter et al. im Druck, Abbildung 17) Funktionen zur vertikalen ^{231}Pa -Verteilung in der Wassersäule angenommen:

$$\text{nördlich der Polarfront:} \quad ^{231}\text{Pa} = 0,05 \frac{\text{dpm}}{\text{m}^3} + 0,01 \frac{\text{dpm}}{\text{m}^3} * \frac{z[\text{m}]}{100 \text{ m}}$$

$$\text{südlich der Polarfront:} \quad ^{231}\text{Pa} = 0,1 \frac{\text{dpm}}{\text{m}^3} + 0,015 \frac{\text{dpm}}{\text{m}^3} * \frac{z[\text{m}]}{100 \text{ m}}$$

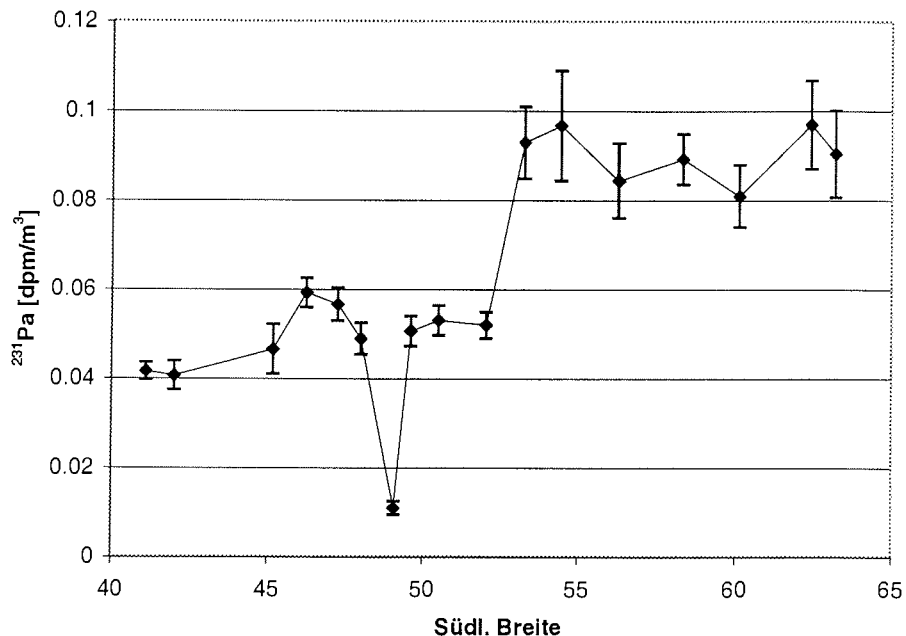


Abbildung 17: Zur Abschätzung der ^{231}Pa -Konzentration im Oberflächenwasser des Südpolarmeers herangezogene Meßwerte (Walter et al., im Druck). Die Werte wurden während der Expedition ANT XV/2 auf einem Schnitt bei ca. 0° Breite gewonnen. Nördlich der Polarfront (ca. 53°S) sind Werte um $0,05 \text{ dpm/m}^3$ zu beobachten, südlich davon um $0,1 \text{ dpm/m}^3$.

Dabei wurde der Fehler des ^{231}Pa -Wertes mit $0,05 \text{ dpm}$ angenommen, was etwa der maximalen Streuung aller gemessenen ^{231}Pa -Werte bei der jeweiligen Tiefe entspricht (vgl. Walter et al., im Druck).

3.2.5 Fehlerbetrachtung

Die Hauptschwierigkeit bei der Bestimmung von ^{227}Ac über α -Strahlung ist die Tatsache, daß die Ausbeute der Probenaufbereitung schwierig zu bestimmen ist. Zwar existiert mit ^{225}Ac ein Nuklid mit 10 Tagen Halbwertszeit, welches grundsätzlich zur Bestimmung der chemischen Ausbeute zu benutzen ist (Martin et al. 1995). Es zerfällt jedoch anders als ^{227}Ac nicht zu Thorium, sondern über einen α -Zerfall zu Francium. Damit wäre eine getrennte α -spektrometrische Messung oder eine Messung von β -Strahlung einer der Töchter von ^{221}Fr nötig. Da die Ausbeute bei der Messung dieses Nuklids wiederum nicht bekannt ist, ist man neben dem Aufwand, eine zweite Messung innerhalb sehr kurzer Zeit (10 Tage HWZ) durchführen zu müssen, wiederum auf Annahmen zur Detektoreffizienz angewiesen. Außerdem wären Verluste bei Töchtern

von ^{225}Ac durch den α -recoil-Effekt zu berücksichtigen, wenn über diese die Ausbeute bestimmt werden soll.

Quantitatives Arbeiten bei der chemischen Aufbereitung der Probe ist also die bessere Alternative. Die Überprüfung der Annahme, daß die chemische Prozedur keine Verluste nach sich zieht, sowie weitere mögliche Fehlerquellen werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

3.2.5.1 Richtigkeit der Messung

Die Annahme, daß Actinium quantitativ von Eisenhydroxid mitgefällt wird, ist essentiell für die später gewonnenen Meßwerte. Aus diesem Grund wurde diese Annahme mit Hilfe eines Standards überprüft. Verwendet wurde der für Uran zertifizierte Sedimentstandard in Pulverform UREM-11 (Hansen und Ring 1983), der auch als ^{231}Pa -Standard verwendet wird. Es wurden sechs Proben von UREM-11 à 0,3 g aufgeschlossen. Die jeweiligen Probenbezeichnungen setzen sich aus dem Namen des Standards, einer laufenden Nummer und dem Jahr, in dem die Analyse durchgeführt wurde, zusammen (also: UREM laufende Nummer/Jahr). Zur Probe UREM 10/98 existieren keine Meßwerte, da sie wegen eines nicht quantifizierbaren Verlustes durch Verschütten von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen wurde.

Nach dem Aufschluß und Überführen der Probe in ca. 40 ml 2 n HCl wurden die Radionuklide einschließlich ^{227}Ac mit einem mit 50 μl FeCl_3 -Lösung (50 mg/ml in 0,1 n HCl) erzeugten Eisenhydroxid-Niederschlag gefällt und nach Abbildung 13, Schritt 3, weiterverarbeitet. Die Eisenkonzentration zur Fällung betrug etwa das Vierfache der Konzentration der bei der Aufbereitung der Wasserproben verwendeten (1 ml FeCl_3 -Lösung in 3 l Lösung). Die Überprüfung der Ausbeute von ^{227}Th erfolgte mit ca. 1,5 dpm ^{230}Th . Da dieses Verfahren mit Ausnahme von Schritt 1 in Abbildung 13 und der etwas abweichenden Eisenkonzentration in Schritt 2 völlig analog zu dem bei der Probenaufarbeitung verwendeten Verfahren war, sind die Ergebnisse auf die Proben übertragbar. Tatsächlich erwies sich die Fällung als quantitativ (Abbildung 18). Im Rahmen des statistischen Fehlers konnte bei allen fünf Proben die zugegebene Menge an ^{227}Ac nachgewiesen werden.

Dennoch besteht das Risiko, daß im Falle eines Verlustes von Eisenniederschlag während der Weiterverarbeitung Actinium verlorengeht. Zur Korrektur eventueller Verluste bestimmte Nozaki (1993) die Ausbeute an Eisen nach der Prozedur. Dies war im vorliegenden Fall nicht möglich, da die Eisenfällung direkt nach der Probennahme

durchgeführt wurde und das Eisen schon bei früheren Bestimmungen vom Actinium wieder getrennt worden war. Diese Tatsache gilt es bei der Interpretation der Meßwerte zu berücksichtigen. Große Fehler in der Ausbeute hätten sich in der berechneten Adsorptionseffizienz später als Ausreißer bemerkbar machen müssen, wurden allerdings nicht beobachtet.

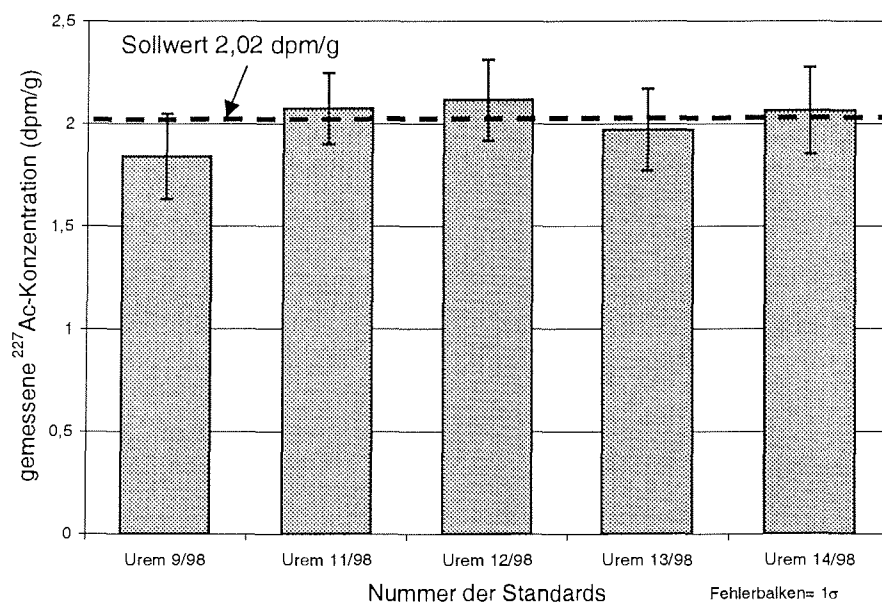


Abbildung 18: Überprüfung des Verfahrens auf eventuelle Verluste bei der Aufarbeitung anhand eines Standards (UREM-11). Die zugegebene Konzentration (Sollwert von 2,02 dpm/g) konnte bei allen fünf Proben im Rahmen des statistischen Fehlers nachgewiesen werden.

Zur experimentellen Bestimmung der Nachweisgrenze wurde an UREM-11 ^{227}Ac in verschiedenen Verdünnungen gemessen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die extrem niedrigen ^{227}Ac -Konzentrationen keine Bestimmung einer Nachweisgrenze mit der für andere Verfahren üblichen Sicherheit erlauben. Eine Anforderung von mehreren Standardabweichungen über dem mittleren Hintergrundwert ist erst bei ^{227}Ac -Konzentrationen zu erwarten, die mehrere Größenordnungen über den im Probenmaterial vorkommenden liegen. Aus diesem Grund ist die Bezeichnung „Nachweisgrenze“ hier nicht im engeren Sinn zu verstehen; es sollte nur eine Grenze der Meßbarkeit von ^{227}Ac mit diesem Verfahren festgestellt werden.

Die Aktivität des Standards beträgt, ein Gleichgewicht von ^{227}Ac und ^{231}Pa angenommen, 2,02 dpm/g. Es wurden dreimal jeweils 0,5 g des Standards

aufgeschossen. Die erhaltene Lösung wurde jeweils auf 25 ml aufgefüllt, so daß sich eine spezifische Aktivität von 0,0404 dpm/ml ergab. Anschließend wurden jeweils Unterproben von 10,0 ml, 2,0 ml, 0,5 ml, 0,1 ml und 0,025 ml entnommen (entsprechend 0,404 dpm, 0,0808 dpm, 0,0202 dpm, 0,00404 dpm und 0,00101 dpm). Die Proben wurden dann der auch sonst im Rahmen der Arbeit verwendeten chemischen Prozedur folgend (Abbildung 13 ab Schritt 2) auf ^{227}Ac untersucht.

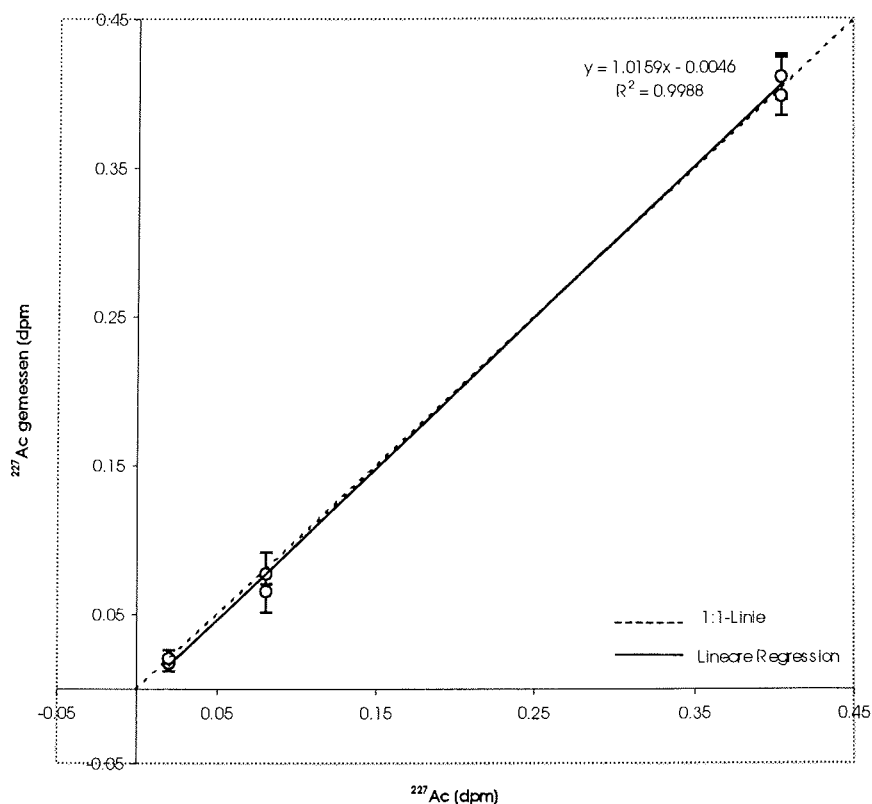


Abbildung 19: Bestimmung der Nachweisgrenze von ^{227}Ac mit α -Spektrometrie. Die Fehlerbalken geben 1σ an.

Nur die drei höchsten Konzentrationen von ^{227}Ac konnten nachgewiesen werden. In den übrigen Proben wurde kein signifikantes Signal über dem Hintergrund gefunden, was gleichzeitig eine Beeinflussung durch Kontamination ausschließt. Eine der drei Proben mit 0,0808 dpm ging bei der Elektrolyse verloren, so daß hier nur zwei Werte vorliegen. Die Regressionsgerade weist eine Steigung von 1,02 auf, was einen Verlust an Actinium durch die Eisenhydroxidfällung ausschließt.

Für die Fehlerbetrachtung (Abbildung 20) wurde ein weiterer Wert von 0,0808 dpm ausgeschlossen, da ein großer Teil dieser Probe bei der Aufarbeitung verloren ging, so daß dieser Wert aufgrund sehr schlechter Ausbeute keinen Anhaltspunkt für eine realistische Fehlerbestimmung liefert. Nur für die Proben mit 0,404 dpm konnte eine statistische Sicherheit von <5% (1σ) erreicht werden. Die übrigen Proben ließen sich erwartungsgemäß nur mit höheren Zählfehlern bestimmen (vgl. Abbildung 20).

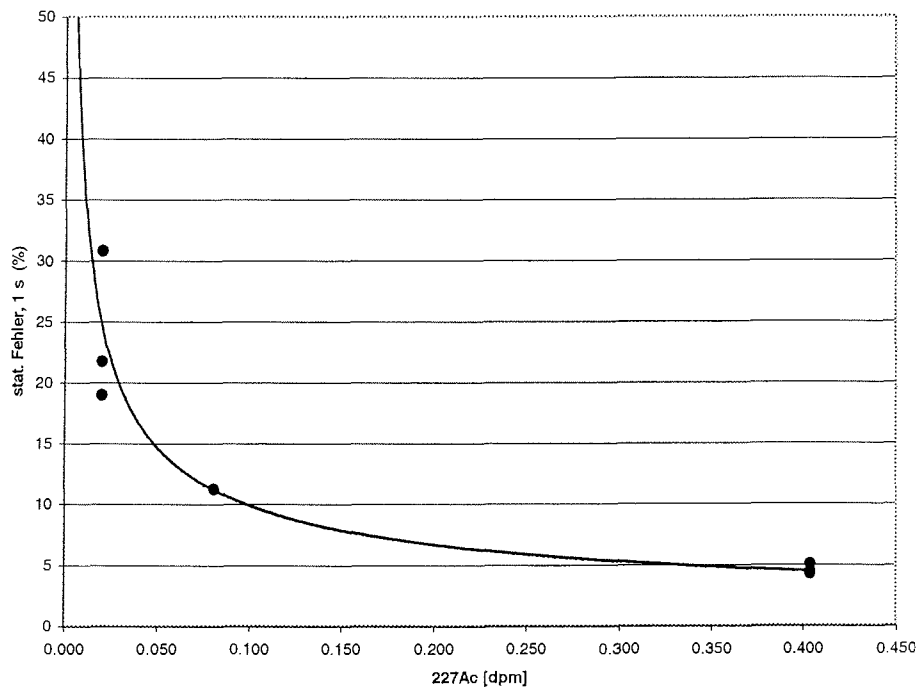


Abbildung 20: Statistischer Fehler (1σ , mit Fehlerfortpflanzung aus Zählfehler berechnet) der Messung gegen die Konzentration. Ein Fehler von 10% wird bei 0,1 dpm unterschritten, 5% bei 0,35 dpm. Die Linie ist ein Ausschnitt einer an die Verteilung angepaßten Potenzfunktion vom Typ $y=a*x^b$, mit einem Exponenten kleiner eins. Sie veranschaulicht den Verlauf des Fehlers mit steigender Konzentration.

Es gibt also weder bei der Überprüfung des Verfahrens auf Verluste noch bei der Nachweisgrenzenbestimmung Hinweise auf eine systematische Abweichung zwischen wahren und gemessenen Werten. Damit kann die hier verwendete Meßmethode als zuverlässig eingeschätzt werden. Aktivitäten von 0,1 dpm lassen sich mit einem Fehler von 10% bestimmen.

3.2.5.2 Genauigkeit der Messung

Der relative Fehler der α -spektrometrischen Messung wurde für die drei bestimmten Nuklide ^{230}Th , ^{227}Th und ^{212}Po jeweils über die Anzahl der beobachteten Ereignisse bestimmt:

$$(17) \quad \text{Err} = \frac{\sqrt{n}}{n}$$

E : rel. Fehler der Messung

n : Anzahl der gezählten Ereignisse

Bei der Subtraktion des Hintergrundwertes wurde auch der Fehler in der Hintergrundbestimmung miteinbezogen (vgl. Rutgers van der Loeff und Moore 1999). Problematisch bei der Bestimmung der Hintergründe ist die hohe Variabilität durch ^{212}Bi , das sich im Verlauf der Messungen auf dem Detektor anreichert. Für ^{227}Th ist der Effekt nicht entscheidend, da sich dieser Anteil des Hintergrundes über die Zerfälle von ^{212}Po subtrahieren läßt. Für ^{212}Po selbst ist keine Korrektur möglich. Diesem Effekt wurde durch eine mehrfache Bestimmung des Hintergrundes begegnet. Generell bilden die ^{212}Po -Hintergründe nur einen geringen Anteil des Fehlers: Der ^{212}Bi -Anteil an der Gesamtaktivität im 6 MeV-Bereich (^{227}Th) durch den Hintergrund ist im Mittel 4%, mit einer Ausnahme (80%) immer <20%, der Anteil des Meßfehlers durch den Hintergrund dementsprechend gering.

Bei den anschließenden Korrekturen wurde jeweils die Fortpflanzung des Fehlers berücksichtigt. Ein hoher Anteil des Fehlers resultiert aus der Bestimmung der Adsorptionseffizienz der Adsorber, da hier die oft sehr geringe Aktivität auf der zweiten Filterkerze in Folge eingeht. Für einige Proben war die Aktivität auf der zweiten Adsorptionseinheit so gering, daß der Fehler in der Effizienzbestimmung sehr groß wurde. Da bei den Proben mit gut bestimmbarer Effizienz ein gleichmäßiger Wert erhalten wurde ($0,69 \pm 0,11$, 1σ), wurde für die Werte mit einem Fehler bei der Effizienzbestimmung von über 0,1 dieser Wert angenommen und dessen Standardabweichung von 0,11 als Fehler der Effizienzbestimmung eingesetzt. Diese Werte sind in der Tabelle der Meßwerte im Anhang entsprechend gekennzeichnet.

Zur Berechnung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ aus ^{227}Ac werden die ^{231}Pa -Aktivitäten der jeweiligen Lokation vom ^{227}Ac -Wert subtrahiert. Dabei muß auch der Fehler des ^{231}Pa -Wertes berücksichtigt werden:

$$(18) \quad Err_{227Acex} = \sqrt{Err_{227Ac}^2 + Err_{231Pa}^2}$$

Nicht miteinbezogen sind eventuelle Verluste an ^{227}Ac vor der Zugabe von ^{230}Th zur Überprüfung der chemischen Ausbeute. Der wahre Wert könnte hierdurch allenfalls unterschätzt werden und die angegebenen Werte sind in jedem Fall Mindestwerte für die ^{227}Ac -Konzentration. Das im Rahmen des Zählfehlers genaue Gleichgewicht der ^{231}Pa -Aktivitäten mit ^{227}Ac in der oberen Wassersäule an nicht durch Advektion beeinflussten Lokationen deutet darauf hin, daß keine nennenswerten Verluste während der Aufarbeitung stattgefunden haben. Das wird auch durch die Untersuchungen zur Richtigkeit der Messung bestätigt.

3.2.6 Alternative Methoden der Messung

Die Konzentrationen von ^{227}Ac im Meerwasser sind so gering, daß selbst nach einer Anreicherung mit den o.g. Methoden nur extrem wenig Material für eine Messung zur Verfügung steht. 1 dpm ^{227}Ac entspricht etwa 6,22 fg (1 fg=10⁻¹⁵ g), so daß bei natürlichen Aktivitäten im Meerwasser zwischen etwa 0,05 dpm und 4 dpm/m³ (entspricht bei Anreicherung aus 2 m³ Wasser einer Masse von 0,622 - 49,8 fg) eine Bestimmung über die Masse derzeit noch nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Die Aktivitäten im Sediment liegen pro Gramm in der gleichen Größenordnung, so daß dies analog für Sedimentproben gilt. Strahlung ist derzeit die bessere Möglichkeit, ^{227}Ac zu messen. Chen et al. (1992) zeigen aufgrund theoretischer Überlegungen, daß Isotope mit einer Halbwertszeit von unter 70 Jahren allgemein besser über ihre Aktivität zu bestimmen sind, da der Zählfehler der Messung von der Anzahl der gemessenen Ereignisse abhängt und unter Berücksichtigung der jeweiligen Detektoreffizienzen bei Nukliden mit Halbwertszeiten unter 70 Jahren mehr Zerfallsereignisse als Massesignale zu zählen sind.

Die von ^{227}Ac selbst abgegebene Strahlung ist nur von geringer Intensität. Zum einen emittiert es beim Zerfall zu ^{227}Th β -Strahlung mit einer Energie von nur 0,05 MeV, zum anderen wird bei diesem Zerfall kaum γ -Strahlung frei, so daß ein direkter Nachweis über die von ^{227}Ac emittierte Strahlung nicht möglich ist. Der Nachweis muß also über die Tochternuklide von ^{227}Ac erfolgen. In einem über mehrere Halbwertszeiten von ^{227}Th (18,7 Tage) geschlossenen System sind die Aktivitäten der Tochternuklide von ^{227}Ac (^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn und weitere) jeweils gleich der ^{227}Ac -Aktivität (radioaktives Gleichgewicht). Da keine starken β -Strahler in der Zerfallsreihe vorkommen, kommt nur

ein Nachweis über α - oder γ -Strahlung eines der Tochternuklide in Frage. Neben der weiter oben ausführlich dargestellten Messung über α -Spektrometrie sollen noch zwei weitere Methoden zur Messung von ^{227}Ac vorgestellt werden.

3.2.6.1 Nachweis über γ -Spektrometrie

γ -Strahlung bietet gegenüber α -Strahlung den meßtechnischen Vorteil, daß sie wesentlich leichter durch Materie dringt. So kann für eine γ -spektrometrische Bestimmung ein Großteil der weiter oben beschriebenen chemischen Aufarbeitung entfallen, da es nicht erforderlich ist, die Probe zu einer möglichst dünnen, reinen Schicht zu verarbeiten. Nachteilig ist allerdings eine geringere Empfindlichkeit der Messung und Probleme bei der Kalibration der Proben. Um das Leistungsvermögen dieser Methode besser einschätzen zu können, wurde sie an einem Sedimentkern exemplarisch angewendet.

Die γ -Strahlung von ^{227}Ac selbst ist nur von geringer Intensität. Seine kurzlebigen Töchter ^{227}Th , ^{223}Ra und ^{219}Rn sind recht gut über γ -Spektrometrie nachzuweisen, so daß grundsätzlich eine Bestimmung von ^{227}Ac auf diese Weise möglich ist. In natürlichen Proben treten Interferenzen mit den γ -Linien anderer Nuklide auf (Yokoyama und Nguyen 1980), so daß nicht alle Linien zur Bestimmung herangezogen werden können.

Bei einem Blick auf die wichtigsten γ -Linien, die für eine Messung von ^{227}Ac in Frage kommen, zeigt sich, daß nur eine Linie (^{219}Rn bei 401,7 keV) frei von störenden Einflüssen ist (Tabelle 5). Um die übrigen Linien dennoch für die Bestimmung heranziehen zu können, müssen sie entweder mit einem so hochauflösenden Detektor gemessen werden, damit die zu messenden Linien von den störenden getrennt werden können, oder die Aktivität der störenden Nuklide muß unabhängig (z.B. bei einer anderen Linie) bestimmt werden und die daraus folgende theoretische Aktivität bei der fraglichen Energie von der gemessenen Aktivität abgezogen werden.

Tabelle 5: Meßbare Tochternuklide von ^{227}Ac und andere Nuklide, die bei ähnlichen Energien strahlen, nach Yokoyama und Nguyen 1980. ^{228}Ac ist kein Tochternuklid von ^{227}Ac ; es wird aufgeführt, weil es die Messung von ^{227}Ac bei mehreren Energien stört und die Kenntnis seiner Aktivität deshalb erforderlich ist für die Messung von ^{227}Ac über γ -Spektrometrie.

Zu messende Nuklide			Störende Nuklide		
Nuklid	E_γ [keV]	Intensität (%)	Nuklid	E_γ [keV]	Intensität (%)
^{227}Th	50,2	8,7	^{238}U	49,5	0,08
^{227}Th	236,0	11,5	^{212}Pb	238,6	43,1
^{227}Th	256,2	6,3	^{214}Pb	259,0	0,58
^{223}Ra	269,4	14	^{228}Ac	270,3	3,2
^{219}Rn	271,0	11	^{214}Pb	274,7	0,5
^{223}Ra	154,3	5,4	^{228}Ac	154,2	0,85
^{219}Rn	401,7	6,7	-	-	-
^{228}Ac	911,1	25	-	-	-

Ein weiteres Problem bei der Bestimmung von ^{227}Ac über γ -Spektrometrie ist die Selbstabsorption von Strahlung in der Probe. Unterschiede in Dichte und Zusammensetzung der Probe (z.B. im Verlauf eines Sedimentkerns) resultieren in unterschiedlichen Zählraten für die gleiche Aktivität. Deshalb ist es bei variierender Probenbeschaffenheit erforderlich, für jede Probe einen Absorptionskoeffizienten zu bestimmen, entweder durch Vermischen der Probe mit einem Standard oder durch Messung der die Probe durchdringenden Strahlung eines Standards. Die Messung von ^{227}Ac über γ -Spektrometrie erfordert also einen erheblichen zeitlichen und meßtechnischen Aufwand. Trotz dieser Schwierigkeiten konnten Yokoyama und Nguyen (1980) an Proben mit vergleichsweise hoher Aktivität (Mangankruste, Korallen, roter Tiefseeton) ^{227}Ac -Aktivitäten bestimmen, ohne allerdings genaue Angaben zu den gemachten Annahmen und Korrekturen zu machen.

Um die Möglichkeit der Messung über γ -Spektrometrie zu überprüfen, wurden bereits früher aufgezeichnete Spektren von Sedimentproben (PS1507, zentrales Weddellmeer) hinsichtlich ihrer ^{227}Ac -Aktivität ausgewertet. Der verwendete Detektor war ein HPGe-Bohrlochdetektor (*high purity* Germanium). Die Daten des Detektors sind in Tabelle 6 im Vergleich mit den von Yokoyama und Nguyen (1980) verwendeten

gegeben. Anhand der Leistungsdaten sollte aufgrund eines größeren Volumen bei nur geringfügig schlechterer Halbwertsbreite davon auszugehen sein, daß die dort vorgestellte Methode gleichermaßen verwendbar ist.

Tabelle 6: Vergleich der Leistungsdaten des verwendeten Detektors mit denen des von Yokoyama und Nguyen (1980) verwendeten

	Hier verwendeter HPGe Bohrlochdetektor	Yokoyama und Nguyen HPGe- Bohrlochdetektor	Yokoyama und Nguyen HPGe- Planardetektor	Yokoyama und Nguyen Ge(Li)- Bohrlochdetektor
Absolute Effizienz bei 122 keV	76,9 %	k.A.	k.A.	k.A.
Halbwertsbreite bei 1,33 MeV	2,05 keV	1,9 keV	1,9 keV	2,3 keV
Effektives Volumen	126 cm ³	45 cm ³	15,7 cm ³	105 cm ³

Tabelle 7: Beispiel einer γ -spektrometrischen Messung von ²²⁷Ac am Sedimentkern PS1507 (GKG). Die Zahlen zu den Energien geben die um den Hintergrundwert bereinigte Anzahl von beobachteten Ereignissen im jeweiligen Energiebereich an.

mittl.Tiefe [cm]	Einwaage [g]	Zählzeit [s]	Anzahl gezählter Ereignisse bei einer Energie von:					
			154 keV	256 keV	269+271 keV	324 keV	401 keV	445 keV
1.5	2.6	188984	720	484	1610	134	312	-
2.5	3.0	144170	552	409	1355	165	307	-
3.5	2.8	193468	661	395	1636	136	323	-
4.5	2.2	237896	641	398	1470	164	220	49
6.3	2.9	80705	191	69	296	-	40	-
8.8	3.9	170484	205	157	356	-	54	103
12.5	2.7	265667	234	176	636	-	-	-
17.5	2.8	188709	191	-	653	-	89	-
22.5	3.0	180866	142	-	388	-	-	-
27.5	3.0	259961	289	103	614	-	-	-
32.5	3.3	172649	442	55	742	76	91	-
37.5	3.0	171866	441	177	810	56	66	-
42.5	2.9	244842	339	303	767	-	87	-
47.5	3.0	273336	333	122	603	69	-	-
52.5	4.0	170002	121	-	309	-	-	-

Die Ergebnisse der Messung eines Tiefseesediments mit typischen Aktivitäten sind in Tabelle 7 und Abbildung 21 dargestellt. Sie zeigen, daß diese Methode für die vorliegenden Aktivitäten keine genauen Ergebnisse liefert, da die Absolutwerte stark von der gewählten Kalibration abhängen.

Bei der Einwaage (das Volumen war bei allen Proben gleich) zeigten sich deutliche Unterschiede, so daß bei gleicher Geometrie eine unterschiedliche Dichte der Proben angenommen werden muß. Das macht für eine präzise Auswertung eine Kalibration jeder einzelnen Probe erforderlich. Davon wurde aufgrund des hohen Aufwands sowie wegen anderer, im folgenden erläuteter Schwierigkeiten Abstand genommen. Die bei Yokoyama und Nguyen (1980) vorgeschlagenen Linien (vgl. Tabelle 5) sind aufgrund der geringeren Aktivitäten nicht immer als *peaks* zu identifizieren. Besonders die Linie bei 401 keV, die nicht durch die Linien anderer Nuklide beeinträchtigt ist, ist selten aufzufinden. Für eine konsistente Auswertung sind bei diesem Beispiel also nur die Linien bei 154 und 269+271 keV verwendbar, da sie als einzige bei allen Proben auftreten. Diese Linien müßten allerdings um die Beiträge von ^{228}Ac (bei 154 keV) und $^{228}\text{Ac}+^{214}\text{Pb}$ (bei 270 keV) korrigiert werden, wenn sie für eine quantitative Bestimmung von ^{227}Ac herangezogen werden sollen. Diese Korrektur wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da sie mit weiteren Kalibrationsunsicherheiten verbunden wäre.

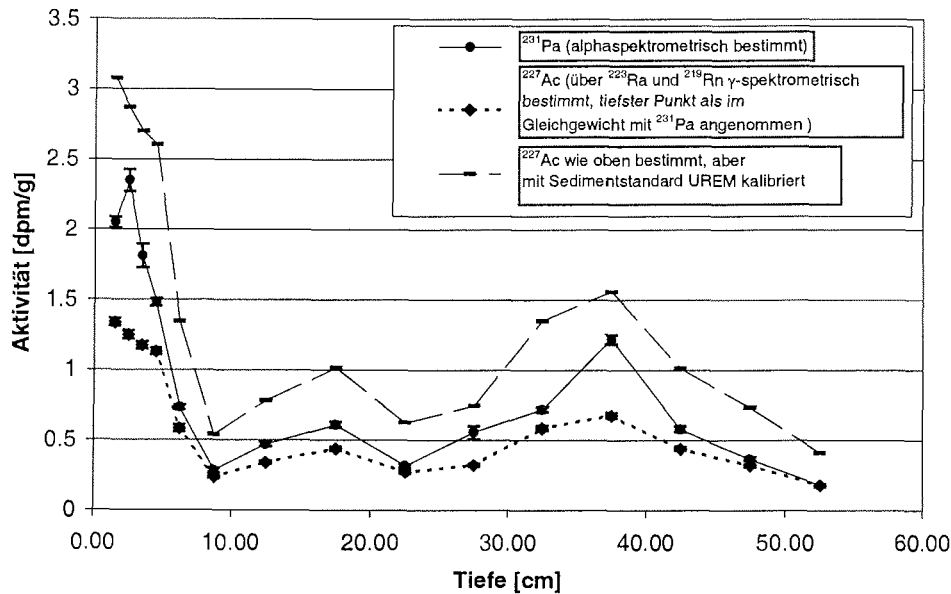


Abbildung 21: Berechnete ^{227}Ac -Aktivität im Kern PS1507 mit zwei unterschiedlichen Kalibrationsarten im Vergleich zu ^{231}Pa (^{231}Pa aus Walter et al. 2000).

Die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Verfahren zur Kalibration sind in Abbildung 21 dargestellt. Im ersten Fall wurde die Annahme getroffen, daß ^{227}Ac bei der größten Sedimenttiefe im Gleichgewicht mit ^{231}Pa ist. Für die übrigen Proben ergaben sich hierdurch Werte unter der ^{231}Pa -Aktivität. Im zweiten Fall wurde zur Kalibration der Sedimentstandard UREM-11 verwendet, der eine vergleichbare Dichte wie die Proben aufweist, und eine gleiche Selbstabsorption wie in den Proben angenommen. Es wurde eine Kurve erhalten, die über der ^{231}Pa -Konzentration liegt. Die Ursache der Unterschiede zwischen den beiden Kalibrationsverfahren muß in unterschiedlicher Selbstabsorption der Proben liegen. Deshalb muß für eine quantitative Auswertung dieser Spektren die Selbstabsorption von Strahlung in jeder Probe ermittelt werden sowie der Beitrag von ^{228}Ac abgezogen werden. Für Proben mit höherer Aktivität wie bei Yokoyama und Nguyen (1980) könnte die störungsfreie Linie bei 401 keV verwendet werden, so daß zumindest die letztere Korrektur wegfällt.

Die Bestimmung von ^{227}Ac über γ -Spektrometrie empfiehlt sich also erst für Gesamtaktivitäten von ca. 10-15 dpm (entsprechend 3-5 dpm/g), oder es müssen entweder längere Meßzeiten oder aufwendige Kalibrationsverfahren in Kauf genommen werden. Für den verwendeten Detektor ist eine absolute Nachweisgrenze von 0,5 dpm ^{227}Ac pro Gramm Sediment bei 2-3 Tagen Meßzeit anzunehmen. Für andere Probenarten wie z.B. Eisenniederschlag einer Seewasserprobe oder MnO_2 -beschichtete Adsorber mit geringerer Selbstabsorption kann diese Grenze noch geringfügig nach unten verschoben werden.

3.2.6.2 Nachweis über α -Szintillation

Ein weiteres mögliches Verfahren zur Bestimmung von ^{227}Ac ist die Bestimmung über ^{219}Rn (Moore und Arnold 1996) mittels α -Szintillation. Durch Messen des von der Probe abgeschiedenen ^{219}Rn -Gases in einem α -Szintillationsdetektor kann unter Berücksichtigung der übrigen Radonisotope auf die ^{227}Ac -Konzentration rückgeschlossen werden. Die Methode zeichnet sich durch einen extrem niedrigen Hintergrundwert aus und sollte damit auch für niedrigste ^{227}Ac -Konzentrationen anwendbar sein. Da die Detektoreffizienz bei 0,8 liegt (Moore and Arnold 1996), wäre eine Aktivität von 0,1 dpm ^{227}Ac in 5000 Minuten, also ca. 3,4 Tagen, mit einem Zählfehler von 5% zu messen. Sollen typische Oberflächenwerte von 0,1 dpm/m³ gemessen werden, so sind für 200 l bei einem Zählfehler von 10% 6250 Minuten, also etwa 4,5 Tage erforderlich. Diese Methode ist einfacher von der Aufarbeitung,

empfindlicher und günstiger als die α -Spektrometrie. Sie birgt das Potential, ^{227}Ac an Wassers schöpferproben zu messen und so mit deutlich geringerem Zeitaufwand Profile von ^{227}Ac zu gewinnen.

4 Ergebnisse

4.1 Partikuläre Anteile von ^{227}Ac

Am Beispiel des Profils PS-2600-4 (Einstrom in den Weddellwirbel) wurde erstmals das Verhältnis zwischen partikulär gebundenem und gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule untersucht. Damit sollte überprüft werden, ob die Untersuchung gelöster Werte ausreicht zur Bestimmung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ und ob ^{227}Ac tatsächlich die ihm zugeschriebene geringe Partikelreaktivität besitzt.

Die partikulären Aktivitäten in 270 m, 2000 m und 3500 m waren so gering, daß kein ^{227}Ac nachgewiesen werden konnte. In den 3 bodennahen Stationen (4885 m, 4985 m, 5080 m) konnten jeweils 0,6, 1,3 und 1,7 % des gesamten ^{227}Ac in der partikulären Phase gefunden werden. Damit ist die Vernachlässigung der partikulären Phase bei der Berechnung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ unter Berücksichtigung der üblicherweise auftretenden Zählfehler von 5-10% gerechtfertigt.

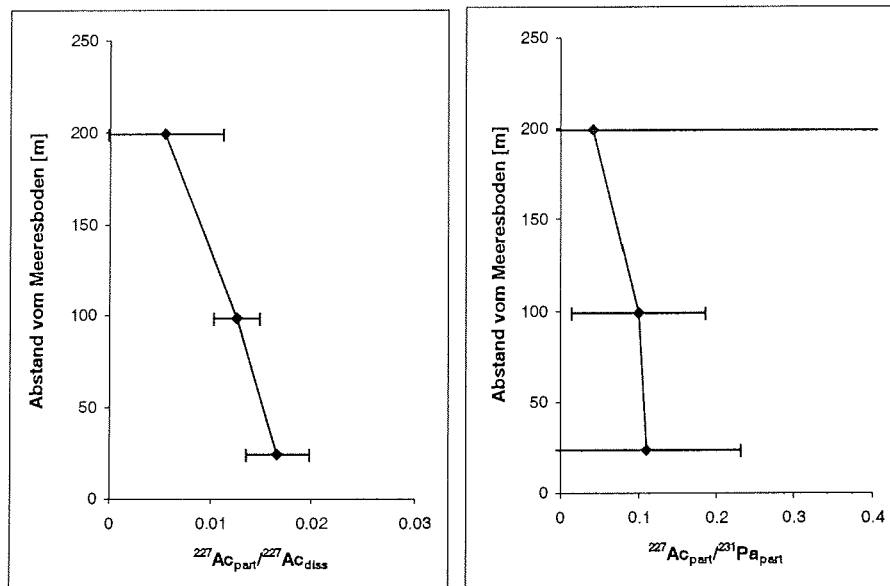


Abbildung 22: Verhältnis von partikulärem zu gelöstem ^{227}Ac (links) und $^{227}\text{Ac}/^{231}\text{Pa}$ -Verhältnisse auf Partikeln in der Wassersäule (PS2600). Die Fehlerbalken geben 1σ an. Nur an den bodennahen Meßpunkten konnte partikulär gebundenes ^{227}Ac nachgewiesen werden. Nicht mehr als 2% des ^{227}Ac waren in der partikulären Phase zu finden. Auf den Partikeln ist ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa stark angereichert.

Auffällig ist eine Abreicherung von ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa in der partikulären Phase. In den Proben, in denen ^{227}Ac nachweisbar war, entspricht die ^{227}Ac -Aktivität jeweils 4, 10 und 11% der ^{231}Pa -Aktivität, was dafür spricht, daß ^{227}Ac von Partikeln rasch an das sie umgebende Wasser abgegeben wird. Der in Partikeln verbleibende Anteil von ^{227}Ac kann auf im Kristallgitter aus ^{231}Pa entstandene und dort verbliebene Atome zurückgeführt werden. Das kann als Indiz dafür gewertet werden, daß ^{227}Ac aus $^{231}\text{Pa}_{\text{ex}}$ tatsächlich mobiler ist als ^{227}Ac aus dem terrigenen Anteil von ^{231}Pa ($^{231}\text{Pa}_{\text{supported}}$), wie in der Modellberechnung für ^{227}Ac -Flüsse aus dem Sediment angenommen.

Diese Meßwerte zeigen erstmals direkt in der Wassersäule die geringe Partikelreaktivität von Actinium.

4.2 Südostpazifik

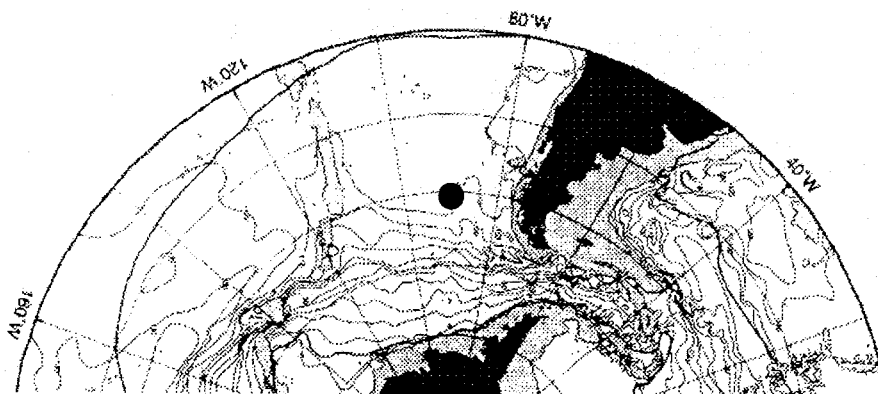


Abbildung 23: Lage des Tiefenprofils PS2660-7. In der Karte sind Linien gleicher Transporte (Orsi et al. 1995) dargestellt. Das Tiefenprofil liegt außerhalb des Bereichs hoher Transporte, dem ACC, und ist demnach kaum von lateralen Strömungen betroffen.

Das Profil aus dem Südostpazifik (PS 2660-7, 50°9'S, 89°13'W, Wassertiefe: 5046 m) wurde im wesentlichen aus zwei Gründen ausgewählt: Zum einen sollte die Lokation kaum von Advektion beeinflusst sein, zum anderen sind dort sehr geringe Sedimentakkumulationsraten zu erwarten, die zu hohen ^{231}Pa -Konzentrationen im Oberflächensediment und damit zu einer starken Freisetzung von ^{227}Ac führen sollten (vgl. Abschnitt 2.2.1). Die Annahme, daß hier nur geringen laterale Strömungen auftreten, wird durch Abbildung 23 bestätigt. Die Fronten des ACC verlaufen deutlich südlich der Station. Auch die Annahme, daß hier hohe ^{231}Pa -Aktivitäten an der

Sedimentoberfläche auftreten, wird durch einen eng benachbarten Meßwert von Station PS2661 (51°24,6'S, 89°21' W) von 3,62 dpm/g gestützt.

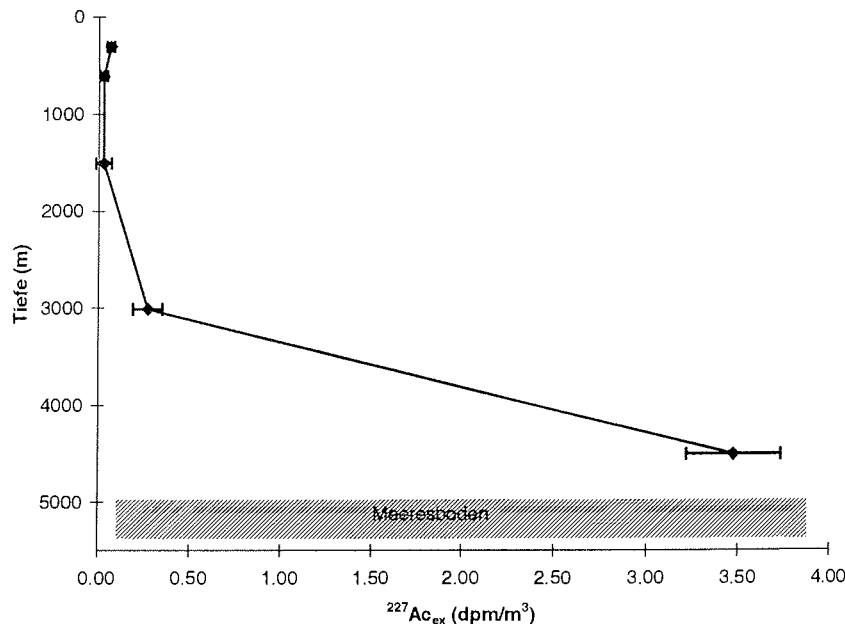


Abbildung 24: Tiefenprofil von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Südostpazifik. Bodennah treten hohe $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen auf, die nach oben hin rasch abnehmen.

$^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ ist bodennah (4510 m, $3,48 \pm 0,26$ dpm/m³) und bei 3010 m ($0,27 \pm 0,08$ dpm/m³) zu finden. Bei 1510 m Tiefe und bei 610 m Tiefe ist kein signifikanter Überschuß von ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa zu beobachten. Erst oberflächennah (310 m) sind wieder $0,07 \pm 0,02$ dpm/m³ $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu messen. Der Vergleich mit den Profilen von Nozaki (1984) spricht dafür, daß an dieser Lokation tatsächlich eine höhere Freisetzung von ^{227}Ac aus den Tiefseesedimenten erfolgt. Der höchste von Nozaki beobachtete Wert lag bei $2,68$ dpm/m³ ^{227}Ac . Im Südostpazifik werden dagegen $3,48$ dpm/m³ $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ (^{227}Ac : $3,91 \pm 0,26$ dpm/m³) gemessen.

Da die Lokation nur 1000 km vom südamerikanischen Festland entfernt ist, kann aufgrund der Tatsache, daß in geringeren Tiefen kein $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ gefunden wird, der Einfluß von ^{227}Ac aus dem Kontinentalhang, welches durch isopyknische Mischung transportiert wird, für diese Distanz ausgeschlossen werden. Das steht im Einklang mit den Modellergebnissen aus Abschnitt 2.2.2, wonach der Kontinentalhang kein starke Quelle für ^{227}Ac ist.

Bemerkenswert ist ein schwaches, aber signifikantes $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Signal nahe der Meeresoberfläche ($0,07 \pm 0,02 \text{ dpm/m}^3$). Damit ist ein Einfluß von Schelfwasser in 310 m Tiefe zu sehen, der bei 610 m Tiefe nicht mehr zu erkennen ist ($0,03 \pm 0,02 \text{ dpm/m}^3$). Im Gegensatz zum Kontinentalhang ist vom Kontinentalschelf also ein schwaches Signal zu messen.

Das Ergebnis bestätigt im wesentlichen die früheren Befunde von Nozaki (1993): Die gemessenen Konzentrationen liegen nah bei den von Nozaki im westlichen Nordpazifik beschriebenen, und die vertikale Verteilung ist ebenfalls ähnlich, allerdings mit einem steileren Gradienten, der auch zu etwas anderen Folgerungen für die vertikale Mischung an dieser Stelle führt (vgl. Abschnitt 5.2.1).

4.3 Arktis

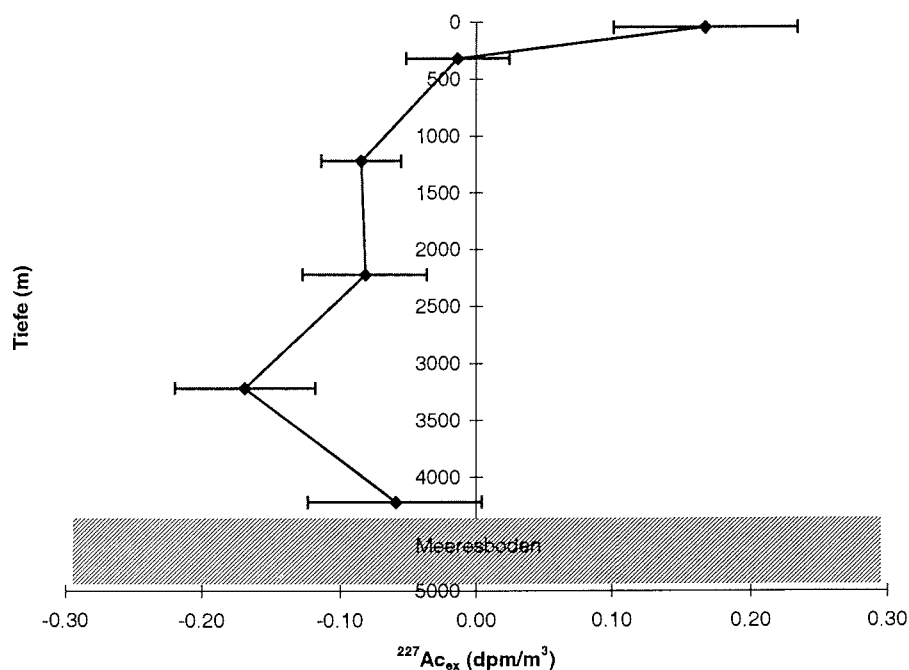


Abbildung 25: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ in der Wassersäule der zentralen Arktis (PS2176-2).

Das Profil in der zentralen Arktis (PS2176-2, $87^\circ 46' \text{N}$, 109°E , 4395 m Wassertiefe) zeigt nur an der Oberfläche einen Überschuß an ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa . Das Profil wurde aufgrund seines hohen ^{228}Ra -Signals ($102,9 \pm 8.8 \text{ dpm/m}^3$) an der Oberfläche ausgewählt, das auf einen Eintrag von Wasser, das längere Zeit mit dem Schelf in

Kontakt gestanden hat, schließen läßt (Rutgers van der Loeff et al. 1995). Dem steht ein $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ von $0,17 \pm 0,07$ entgegen. Das Aktivitätsverhältnis $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ von ca. 600, das sich daraus ergibt, ist nicht mehr allein durch unterschiedliche Freisetzung der Radionuklide im Schelfsediment zu erklären (vgl. Abschnitt 2.2). Zur Erklärung des hohen $^{228}\text{Ra}/^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Verhältnisses sowie der Abreicherung von ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa im übrigen Profil stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung.

Zum einen kann hier eine verschiedene Partikelreaktivität der beiden Elemente zu einer bevorzugten Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule ins Sediment führen. Die aus der chemischen Aufarbeitung von ^{227}Ac im Labor bekannte Affinität zu Eisen- und Manganoxiden könnte in einer Region mit hohem Eintrag terrigener Materials zu einer schnellen Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule führen. Terrigene Partikel aus dem Schwankungsbereich des Grundwassers weisen häufig Überzüge von Eisenhydroxiden und Mangandioxid auf. Diese Verbindungen adsorbieren ^{227}Ac effektiv. Damit wäre eine Abreicherung von ^{227}Ac über die gesamte Wassersäule erklärbar, wenn vom Kontinent Partikel mit solchen Überzügen eingetragen werden.

Zum anderen muß bedacht werden, daß der partikuläre Anteil von ^{227}Ac in der Wassersäule nicht gemessen wurde. Das an einem radioaktiven Gleichgewicht mit ^{231}Pa fehlende ^{227}Ac könnte somit auf Partikeln in der Wassersäule zu finden sein. Dazu wäre allerdings erforderlich anzunehmen, daß an dieser Lokation ca. 5-50% (je nach Tiefe) des gesamten ^{227}Ac an Partikel adsorbiert wäre. Unter Berücksichtigung der Befunde zur Partikelreaktivität in Abschnitt 2.1 und 4.1 scheint diese Möglichkeit allein jedoch wenig plausibel. Die Abreicherung von ^{227}Ac gegenüber ^{231}Pa in der zentralen Arktis kann auch durch eine Kombination der zwei oben genannten Möglichkeiten erklärt werden.

Abschließend bleibt zu bemerken, daß der im Vergleich zu ^{228}Ra geringe ^{227}Ac -excess an der Oberfläche die Modellergebnisse aus Abschnitt 2.2 bestätigt: Der Schelf ist eine schwache Quelle für ^{227}Ac .

4.4 Drake Passage

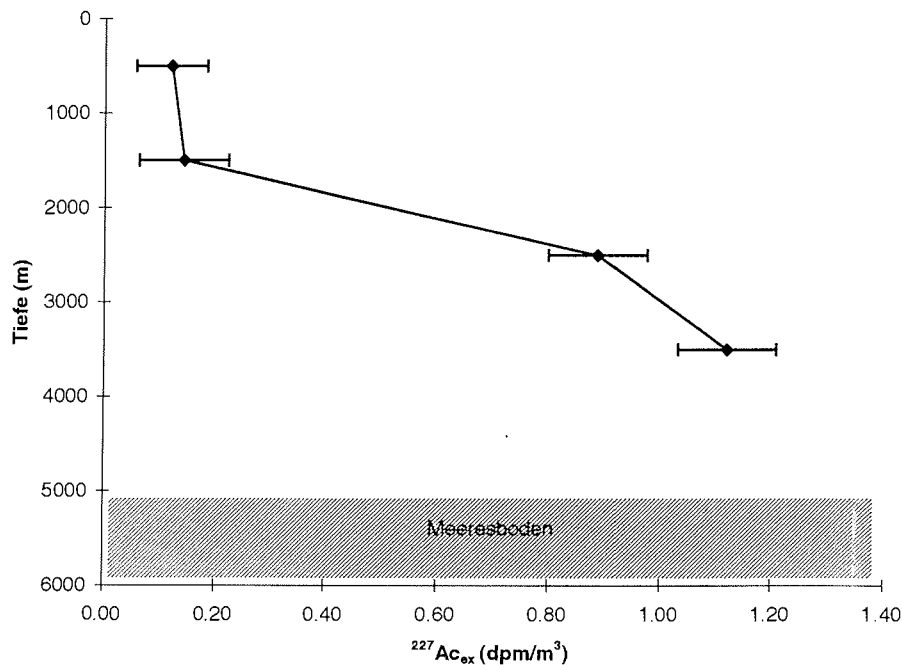


Abbildung 26: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ in der Drake Passage (PS2337)

Das Profil in der Drake Passage (Abbildung 26: PS2337; $56^{\circ}37'S$, $54^{\circ}55'W$, 5106 m Wassertiefe) diente der Feststellung der Verteilung von ^{227}Ac im ACC ohne den Einfluß des NADW. Die Station liegt im Bereich der Polarfront. Die Meßwerte zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen dem UCDW (gekennzeichnet durch ein Sauerstoffminimum, vgl. Abbildung 27, s. auch Whitworth und Nowlin 1987) und dem darunterliegenden LCDW. Während im UCDW nur ein geringer Überschuß an ^{227}Ac vorliegt ($0,12 \pm 0,06$ dpm/m³ in 500 m Tiefe; $0,14 \pm 0,08$ dpm/m³ in 1500 m Tiefe), sind im LCDW höhere Werte ($0,89 \pm 0,09$ dpm/m³ in 2500m Tiefe; $1,12 \pm 0,09$ in 3500 m Tiefe) zu beobachten. Der markante Sprung in der vertikalen Verteilung von ^{227}Ac zeigt, daß hier nicht mehr nur Mischung, sondern horizontale Advektion $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ steuert. Der Unterschied zwischen UCDW und LCDW ist auch weiter östlich noch nachzuweisen, wie der nachfolgende $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Profilschnitt durch den ACC (Abbildung 28) und das Profil im Einstromgebiet des Weddellwirbels (Abbildung 31) zeigen.

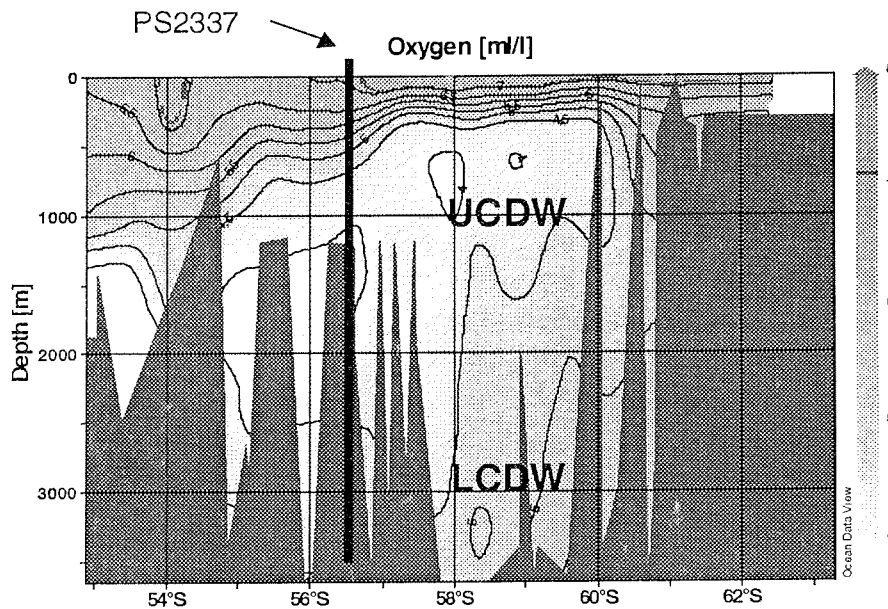


Abbildung 27: Sauerstoffverteilung auf einem Schnitt von 53°S bis 63°S bei 55°W. Quelle: Swift et al. 1999. Die senkrechte dunkle Linie gibt die Lage des Actiniumprofils an. UCDW und LCDW sind an der 4,5 ml/l-Isolinie für Sauerstoff (dem Übergang von hell zu dunkel im zentralen Abbildungsteil) zu trennen (Orsi et al. 1995). Die Grenze zwischen UCDW und LCDW liegt demnach an der Probenlokation bei ca. 2500 m.

4.5 Profilschnitt durch den ACC

Ein Profilschnitt durch den ACC sollte zeigen, ob ein Zusammenhang zwischen Auftrieb von Tiefenwasser und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ besteht. Vier Tiefenprofile von ^{227}Ac wurden hierzu im Rahmen der Expedition ANT XVI/3 gewonnen. Es wurde nur die obere Wassersäule bis 1000 m beprobt. Die Wassermenge, aus der die Radionuklide extrahiert wurden, war zu gering, um ^{231}Pa zu bestimmen, so daß die Werte auf der Basis benachbarter ^{231}Pa -Konzentrationen (Oberflächenwerte: Walter et al. im Druck; Tiefenwerte: Rutgers van der Loeff und Berger 1993) geschätzt wurden, vgl. Abschnitt 3.2.4. Der Fehler dieser Schätzung wurde auf der Basis der Streuung der für die jeweiligen Tiefe und Region gemessenen ^{231}Pa -Werte mit 0,05 dpm/m³ angenommen. In Kombination mit dem Zählfehler für ^{227}Ac ergeben sich damit teilweise prozentual sehr hohe Fehler (>100%), die in Anbetracht der niedrigen Absolutwerte jedoch die Aussage des Profilschnitts nicht beeinträchtigen.

Mit Ausnahme von Profil PS53-197 zeigen alle Profile (vgl. Abbildung 28) die einheitliche Tendenz von zunehmendem $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ mit der Tiefe und abnehmendem $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ von Süd nach Nord. Diese Beobachtungen entsprechen den Erwartungen unter

Berücksichtigung der Tatsachen, daß die Quelle von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ der Tiefseeboden ist und südlich der Polarfront Auftrieb von Tiefenwasser erfolgt. Besonders auffällig sind die hohen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte an der südlichsten Station (54°S) bei 700 und 1000 m Tiefe. Diese Meßpunkte liegen nach den hydrographischen Daten (Abbildung 29) im LCDW, und die Konzentrationen von jeweils ca. 0,6 dpm/m³ sind dementsprechend deutlich höher als die für UCDW an den anderen Stationen (PS2660, PS2337) beobachteten Werte. Eine Ausnahme von der generellen Zunahme von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ mit der Tiefe und mit der südlichen Breite bildet Station PS53-197. Hier sind in geringen Tiefen (120 m, 400 m, 700 m) vergleichsweise hohe $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen von jeweils 0,26, 0,31 und 0,24 dpm/m³ zu beobachten, während in 1000 m nur 0,09 dpm/m³ zu messen sind. Die hohen Oberflächenwerte bei 52°S werden hier als Folge von tiefem Auftrieb gedeutet, was im folgenden mit weiteren Daten belegt werden soll (Abbildung 29).

Neben Salzgehalt und potentieller Temperatur wurden Nährstoffdaten (Nitrat, Nitrit, Phosphat, Silikat: C.Hartmann, AWI) sowie gelöstes Eisen (P.Croot, NIOZ) bestimmt. Letzteres ist von besonderem Interesse, da Eisen eine große Rolle bei der Limitierung der Produktion im Südozean zugeschrieben wird (Martin et al. 1990). Der mögliche Einsatz von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zur Identifikation von Eiseneinträgen aus dem Tiefenwasser wird in einem eigenen Abschnitt behandelt (5.2.2).

Im Profilschnitt ist eine große Ähnlichkeit zwischen der Verteilung der Nährstoffe, insbesondere Nitrat und Phosphat, und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu erkennen (vgl. Abbildung 29). Die geringeren $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen in der Tiefe bei 52°S sind auch in den Phosphat- und Nitratwerten widerspiegelt. Der Verlauf der Linien gleicher Konzentration deutet darauf hin, daß bei 52°S nährstoffreiches Tiefenwasser bis weit zur Oberfläche gedrungen ist. Der Nachweis von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ an der Meeresoberfläche, das durch tiefen Auftrieb so weit nach oben gelangt ist, stellt ein Novum dar. Nur durch sehr raschen Auftrieb kann ^{227}Ac von seiner Quelle am Meeresboden zur Meeresoberfläche gelangen, da die vergleichsweise kurze Halbwertszeit von ^{227}Ac (21,77 Jahre) sonst vorher zum Zerfall geführt hätte.

Im direkten Vergleich zwischen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ und verschiedenen Nährstoffen und Eisen (Abbildung 30) ist ein schwacher positiver Zusammenhang zwischen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ und Nitrat sowie Phosphat zu erkennen. Für Silikat und Eisen ist kein Zusammenhang zu sehen. Im Querschnitt (Abbildung 29) sieht man, daß die gemessenen Eisenkonzentrationen auch für gleiche Wassermassen stark streuen. Auf den ersten Blick ist es überraschend, daß der Zusammenhang von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ mit Silikat schlechter ist als mit Phosphat und Nitrat, da Silikat und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ beide aus größeren Tiefen stammen,

während Phosphat und Nitrat schon durch Auftrieb aus geringeren Tiefen an die Oberfläche kommen können. Dies kann durch den Zerfall von ^{227}Ac seit seiner Freisetzung aus Tiefseesedimenten erklärt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß dieser Profilschnitt einen deutlichen Hinweis liefert, daß $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Südpolarmeer durch tiefen Auftrieb bis zur Oberfläche gelangen kann.

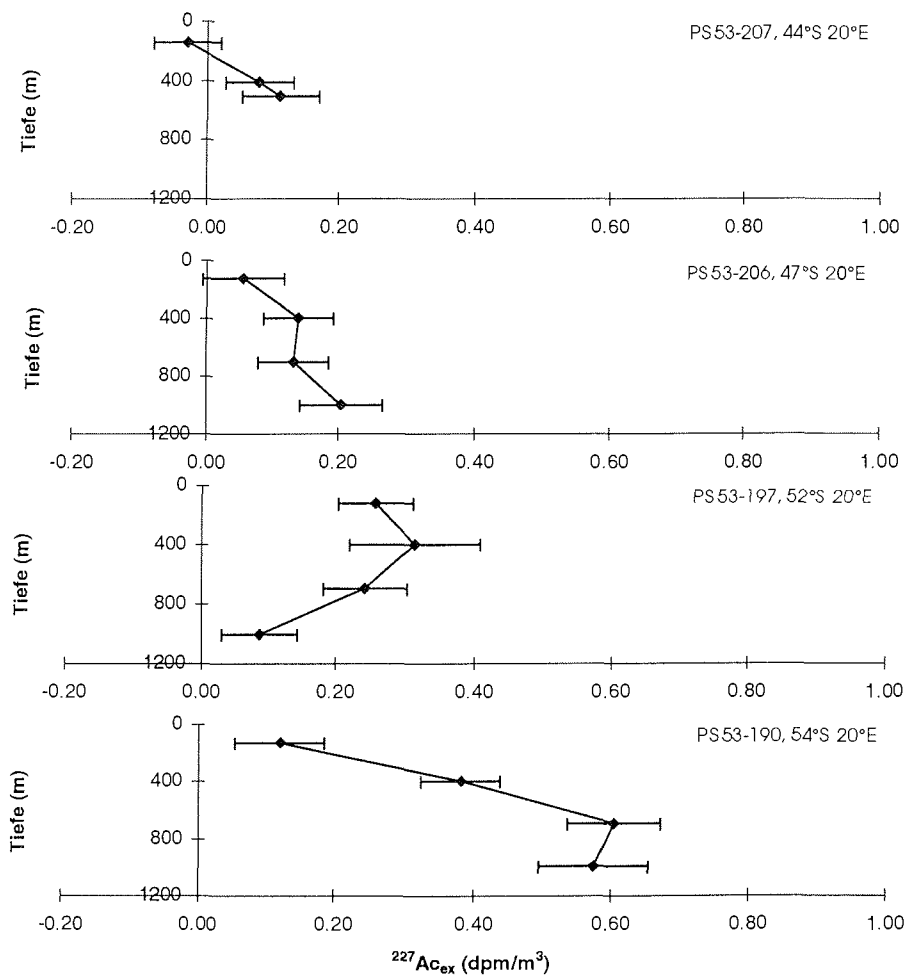
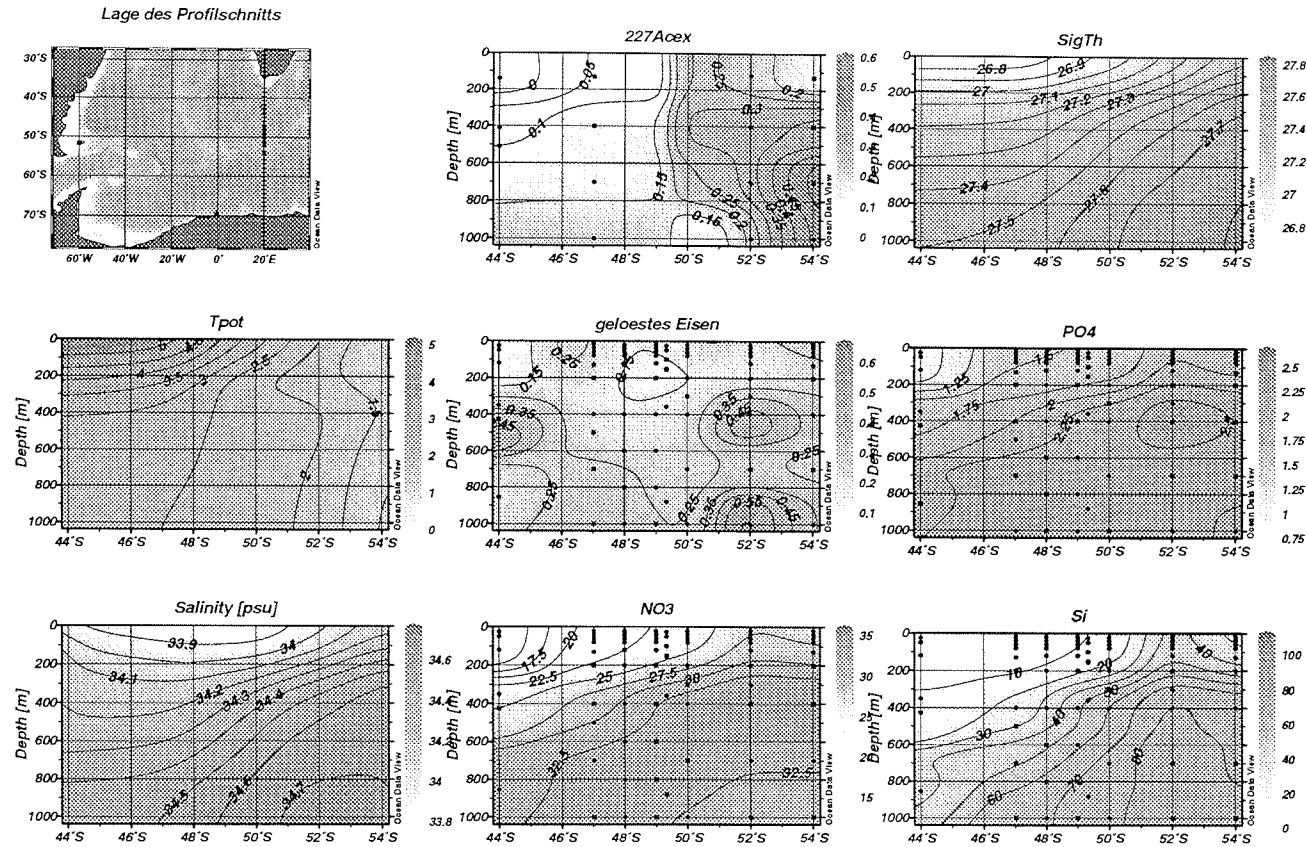


Abbildung 28: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Profilschnitt durch die oberen 1000 m des ACC bei 20°E. Hohe $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte in Tiefen >400 m bei der südlichsten Station. Die Stationen PS53-197 und PS53-190 liegen südlich der Polarfront (49°30'S). Die durchmischte Schicht lag jeweils, von Nord nach Süd genannt, bei 40 m, 80 m, 70 m und 100 m. Alle Meßpunkte liegen damit unterhalb der durchmischten Schicht.

Abbildung 29: Bisher unveröffentlichte Daten von: T_{pot} , Salzgehalt, Dichte (σ_t), $^{227}\text{Ac}_{ex}$ (Verfasser), gelöstem Eisen (P.Croot) und Nährstoffen (C.Hartmann) auf einem Schnitt von 40°S - 55°S bei 20°E , gewonnen während Expedition ANT XVI/3,1999. Die Polarfront liegt bei $49^\circ30'\text{S}$.



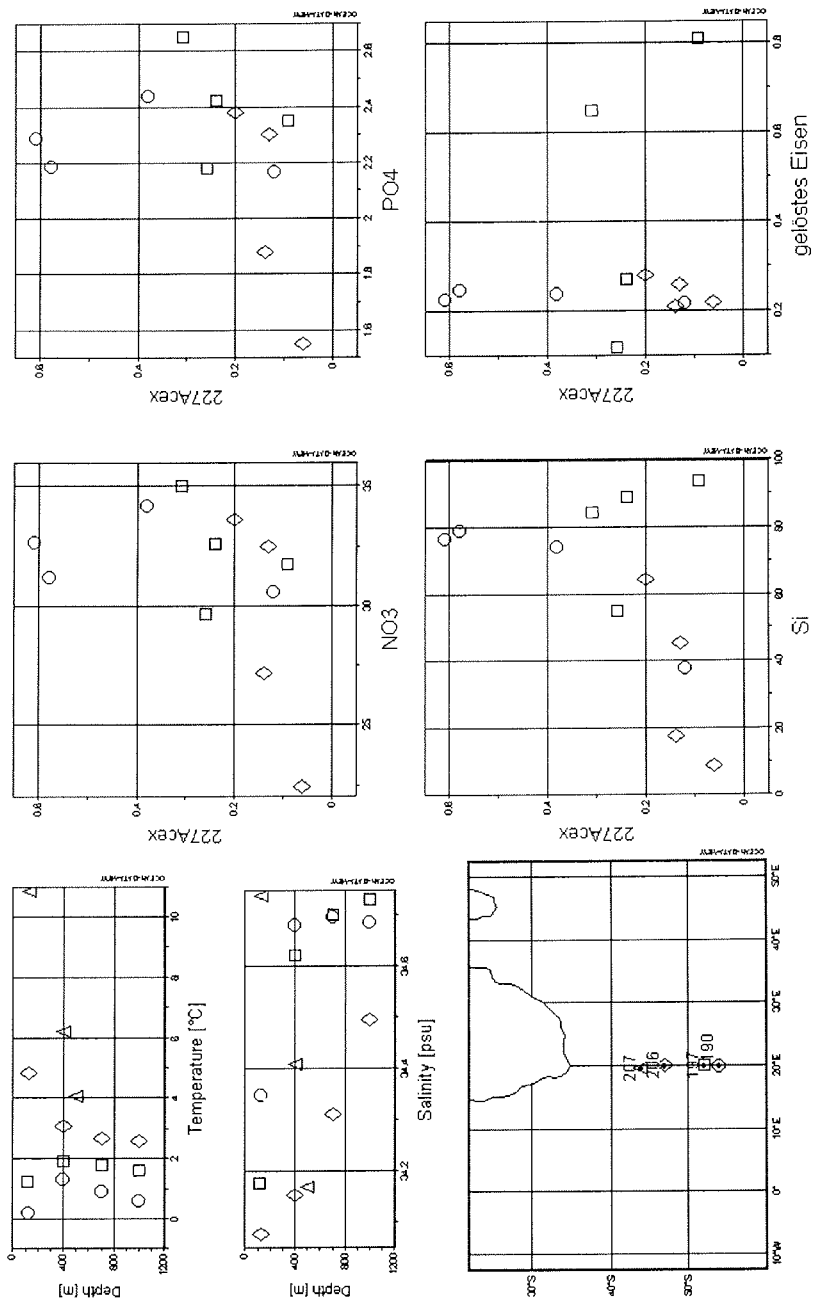


Abbildung 30: Vergleich des Zusammenhangs zwischen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ und verschiedenen Nährstoffen auf dem Profilschnitt durch den ACC, nach Stationen aufgeschlüsselt. Für Nitrat und Phosphat ist ein schwacher positiver Zusammenhang mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu erkennen. Für Silikat und Eisen ist kein einfacher Zusammenhang erkennbar.

4.6 Einstrom in den Weddellwirbel

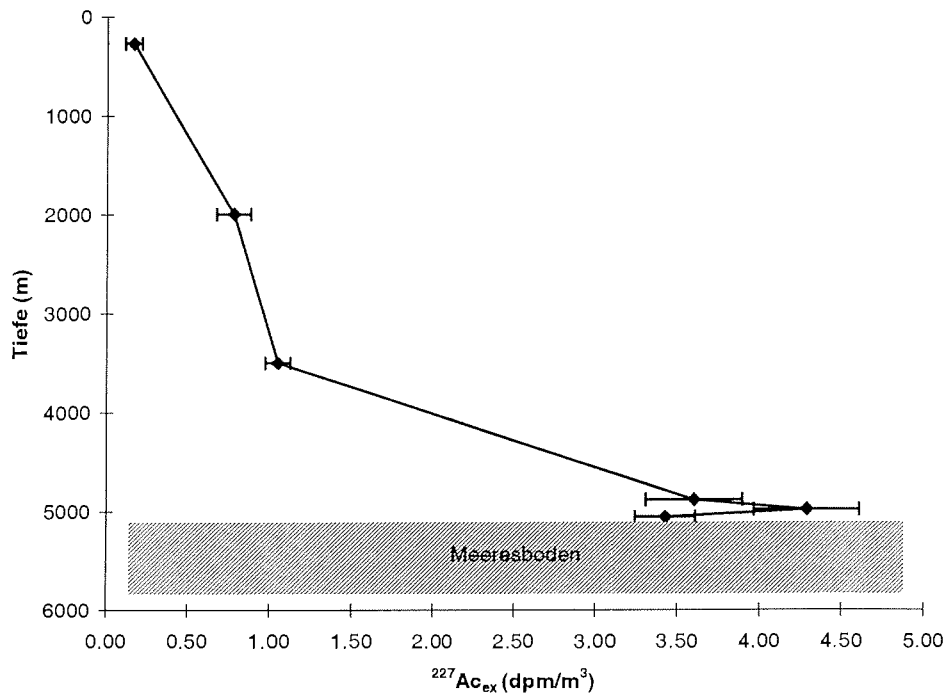


Abbildung 31: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Einstromgebiet des Weddellwirbels (PS2600-4)

Die Station im Einstromgebiet des Weddellwirbels (PS2600-4, $63^{\circ}11'S$, $34^{\circ}36'E$, 5084 m Wassertiefe) zeigt über die gesamte Wassersäule ^{227}Ac im Überschuß zu ^{231}Pa . Das Profil ist vergleichbar mit der Situation in der Drake Passage mit zusätzlichen bodennahen Meßpunkten. Erneut zeigt das UCDW (hier bei 270 m) kaum $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ ($0,16 \pm 0,05$ dpm/m³) und ist damit hinsichtlich seines Actiniumgehalts nicht signifikant verschieden vom UCDW in der Drake Passage. Im LCDW sind hier $0,78 \pm 0,10$ (2000 m) bzw. $1,05 \pm 0,08$ (3500 m) dpm/m³ zu messen. Das ist ebenfalls nicht signifikant verschieden von den Werten in der Drake Passage: $0,89 \pm 0,09$ (2500 m) bzw. $1,12 \pm 0,09$ (3500 m).

Drei bodennahe Meßpunkte zeigen alle sehr starken ^{227}Ac -Überschuß, der Wert bei 4985 m Tiefe von $4,29 \pm 0,32$ dpm/m³ ist der höchste je beobachtete Wert für $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$. Die Schwankungen in einem recht geringen Tiefenintervall (24 m über Grund, 99 m über Grund und 199 m über Grund) sind durch den Zählfehler zu erklären (Fehlerbalken geben nur 1σ an).

Die Gleichartigkeit der Profile der Drake Passage und an dieser weit entfernten Lokation läßt annehmen, daß die beobachtete Vertikalverteilung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ repräsentativ für den ACC, zumindest im Atlantischen Sektor, ist. In Anbetracht der hohen Geschwindigkeiten des ACC (auch in Tiefen >2000 m teilweise noch Geschwindigkeiten über 5 cm/s nach Whitworth und Nowlin 1987) ist die geringe Modifikation des Signals über große Distanzen nicht überraschend. Da bei Station PS2600 im Vergleich zu Station PS2337 eine Zumischung des NADW in das LCDW erfolgt ist, scheint die NADW-Komponente keine signifikante Änderung des $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Signals herbeizuführen. Die Quelle für die höheren ^{227}Ac -Konzentrationen im LCDW muß also an anderer Stelle gesucht werden, kann jedoch derzeit noch nicht lokalisiert werden. Es kommen sowohl die Sedimente des ACC als auch der Südpazifik in Frage. Hier bietet sich $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ für zukünftige Untersuchungen zu möglichem Bodenkontakt von LCDW oder einer Beimischung von Bodenwasser an.

4.7 Weddellwirbel

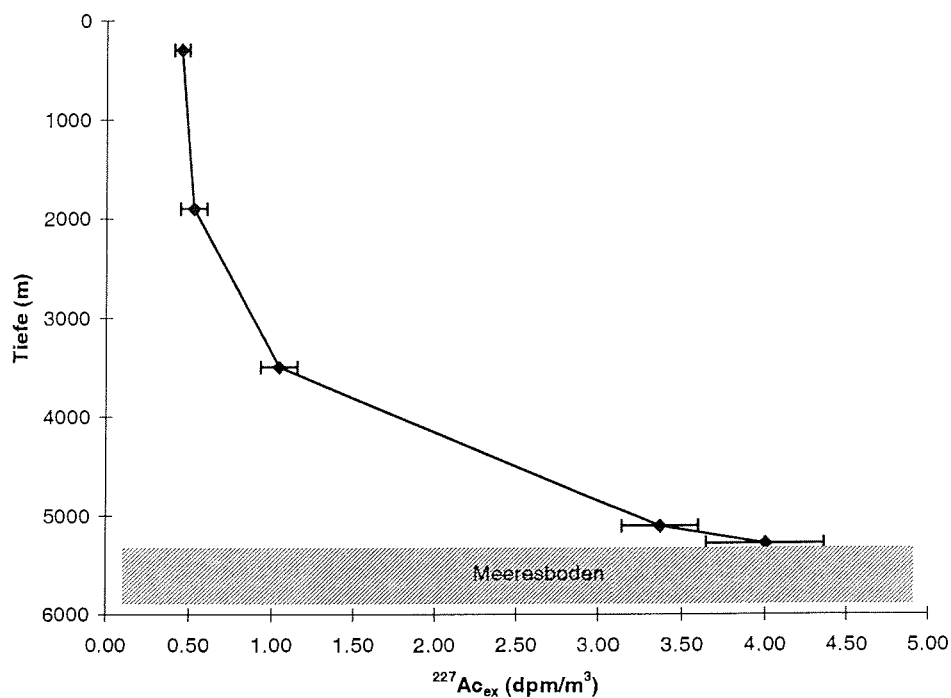


Abbildung 32: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im zentralen Weddellwirbel (PS2579-2)

Das Profil an der Station PS2579-2 (62°59'S, 7°45'E, 5324 m Wassertiefe) zeigt als Besonderheit hohe Werte von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ durchgehend bis zum flachsten Meßpunkt (300 m). Der Vergleich mit dem Profil aus der zentralen Arktis, für das über ^{228}Ra ein starker Einfluß von Schelfwasser nachgewiesen wurde (Rutgers van der Loeff et al. 1995), zeigt, daß dieser Sachverhalt nicht durch einen Eintrag von Schelfwasser erklärt werden kann. Während bei extremem Schelfwassereinfluß in der Arktis nur Werte von $0,17 \pm 0,07 \text{ dpm/m}^3$ (50 m) bzw. kein nachweisbares Ac_{ex} (320 m) parallel zu einem extrem hohen ^{228}Ra -Signal gefunden werden (102 dpm/m^3), sind im zentralen Weddellwirbel $0,46 \pm 0,05 \text{ dpm/m}^3$ $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu finden, wobei benachbarte ^{228}Ra -Messungen (60°34'S, 3°58'E, Rutgers van der Loeff 1994) Werte von weniger als 2,1 dpm/m^3 ergaben. Damit scheidet Schelfwasser als Erklärung für die hohen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte im Weddellwirbel aus.

Zur Erklärung der hohen oberflächennahen Werte kommt isopyknischer Transport eines Signals vom Kontinentalhang ebenfalls nicht in Frage. Der nächstgelegene Kontinentalhang (Antarktis) ist ca. 900 km entfernt, und ein potentiell Signal vom Hang müßte sich über diese Distanz entgegengesetzt zur Strömung ausbreiten. Im Vergleich dazu sind bei Nozaki und Yang (1987) die Stationen, für die ein Einfluß des Kontinentalhangs angenommen wird, max. 300 km vom Hang entfernt, die Messungen beziehen sich auf größere Tiefen (1470-4245 m) und sie sind bodennäher (max. Distanz zum Boden 1105 m).

So bleibt zur Erklärung der hohen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte im Weddellwirbel entweder extrem rasche diapyknische Mischung (vgl. Abschnitt 5.2.1) oder Advektion mit einer vertikalen Komponente (vgl. Abschnitt 5.2.3), was in guter Übereinstimmung mit anderen Befunden steht. Aufgrund der Zeitinformation durch den radioaktiven Zerfall von ^{227}Ac kann dieser Tracer dazu eingesetzt werden, quantitative Aussagen über diapyknische Mischung oder die Geschwindigkeit des Auftriebs von Tiefenwasser zu treffen. Die möglichen Anwendungen der oben beschriebenen Profile werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

5 Diskussion

5.1 Erste Abschätzung der globalen Verteilung von ^{227}Ac im Ozean

Bisher lagen noch keine Angaben zur globalen Häufigkeit von ^{227}Ac im Meerwasser vor. Die gewonnenen Meßwerte erlauben nun erstmals Aussagen über die erwartete globale Verteilung von ^{227}Ac . Die gemessenen Aktivitäten von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ schwanken von nahe null bis $4,91 \pm 0,32 \text{ dpm/m}^3$ ^{227}Ac . Generell sind bodennah die höchsten Konzentrationen festzustellen. In den Stationen nördlich der Polarfront ist in der mittleren Wassersäule kein $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ nachzuweisen. Erst oberflächennah treten dort vereinzelt wieder meßbare $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivitäten auf. In Verbindung mit tiefem Auftrieb im Südpolarmeer ist stellenweise $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ über die gesamte Wassersäule zu messen. Dies wurde an einer Station im ACC, beim Einstrom in den Weddellwirbel sowie im Weddellwirbel selbst beobachtet. Das Südpolarmeer mit hohen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen ist bei den Messungen stark überrepräsentiert.

Für die genaue Berechnung eines mittleren ^{227}Ac und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Gehaltes des Ozeans sind noch zu wenige Profile vorhanden. Für Tiefseegebiete mit geringerer lateraler und vertikaler Dynamik als dem Südpolarmeer, die weltweit den größten Anteil der Ozeane stellen, existieren nur die Profile von Nozaki (1984) sowie ein Profil im Südostpazifik (diese Arbeit). Ein weiteres Profil von Nozaki (1990) ist nicht allgemein übertragbar, da es die Situation in einem über 10000 m tiefen Tiefseegraben wiedergibt. Das Profil in der Arktis, das nur oberflächennah eine geringe $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentration aufweist, ist derzeit nicht auf eine Fläche zu beziehen, da unklar ist, welche Prozesse für die Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule verantwortlich sind.

Für die Abschätzung der globalen Tiefenverteilung von ^{227}Ac und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ wurden deshalb nur vier Profile ausgewählt. Dies sind zum einen zwei Profile aus dem Nordpazifik (Nozaki 1984), zum anderen das Profil aus dem Südostpazifik und das Profil aus der Einstromregion in den Weddellwirbel. Letzteres wurde als Vertreter für den ACC und das Weddellmeer gewählt, da diese Region eine Rolle für die Gesamtmenge im Ozean befindlichen Actiniums spielen kann. Alle übrigen Profile wurden ausgeschlossen, um besondere lokale Situationen, wie oben geschildert, in der Schätzung nicht überzurepräsentieren. Die Meßwerte der ausgewählten Profile für ^{227}Ac und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 wiedergegeben.

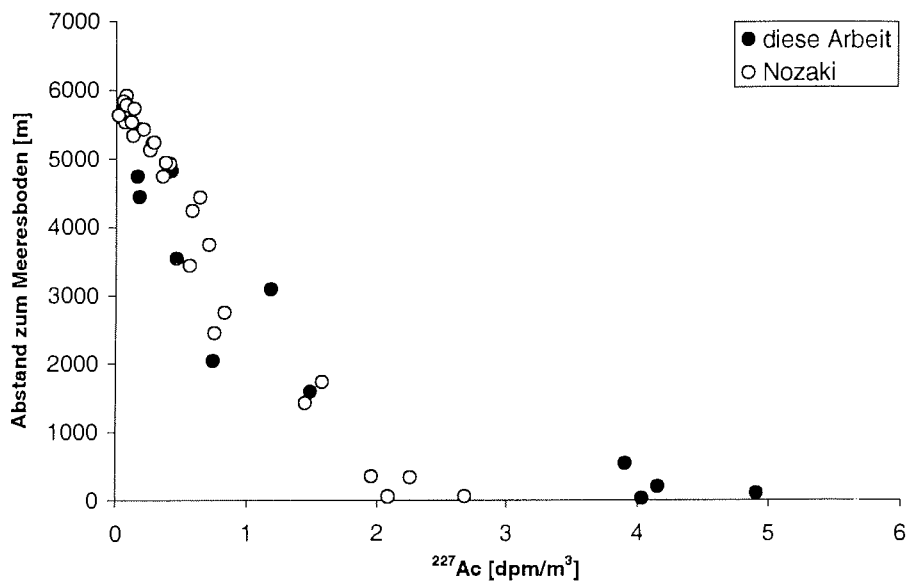


Abbildung 33: ^{227}Ac -Aktivitäten an ausgewählten Profilen aus dieser Arbeit (Südpazifik, Einstrom in den Weddellwirbel) und aus Nozaki (1984). Diese Profile wurden zur Abschätzung der globalen ^{227}Ac -Konzentration herangezogen.

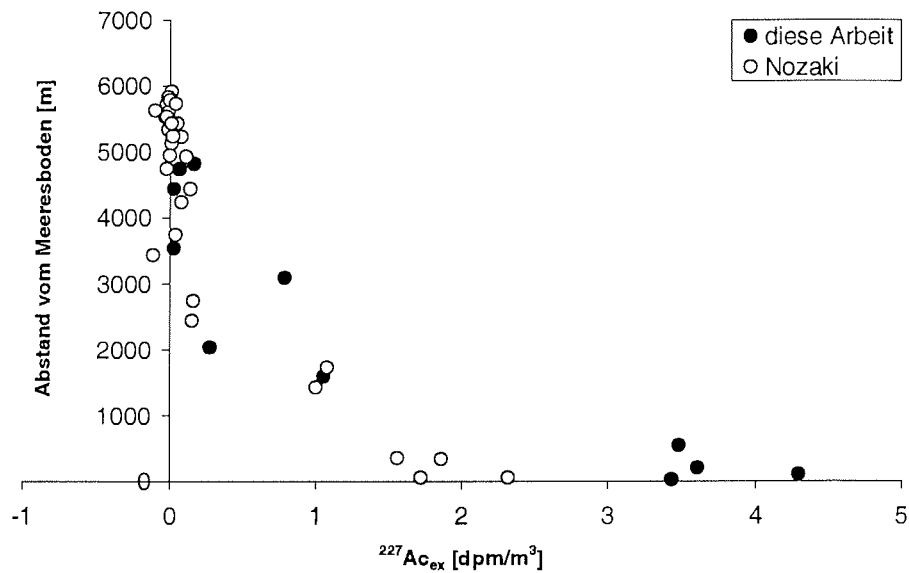


Abbildung 34: $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ an ausgewählten Profilen aus dieser Arbeit (Südpazifik, Einstrom in den Weddellwirbel) und aus Nozaki (1984). Diese Profile wurden zur Abschätzung der globalen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentration herangezogen.

Tabelle 8: ^{227}Ac und $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivitäten in verschiedenen Tiefenintervallen auf der Basis der in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellten Tiefenprofile

Abstand vom Meeresboden	^{227}Ac [dpm/m ³]	$^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ [dpm/m ³]
<1000 m	3,3	2,8
1000-<2000 m	1,4	1
2000-<3000m	0,8	0,3
3000-4000 m	0,6	0
Mittlere Aktivität in der Wassersäule	1,5	1

Für eine erste Schätzung auf dieser Grundlage wurden für verschiedene Tiefenintervalle mittlere Actiniumaktivitäten bestimmt (Tabelle 8). Es wurde eine mittlere Tiefe des Ozeans von ca. 4000 m (Gierloff-Emden 1980) zugrundegelegt. Es ergab sich für ^{227}Ac eine mittlere Aktivität von 1,5 dpm/m³, für $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ eine mittlere Aktivität von 1 dpm/m³. So errechnet sich mit einem Volumen der Ozeane von ca. $1,35 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ (Gierloff-Emden 1980) eine Gesamtaktivität von $2 \cdot 10^{18}$ dpm ^{227}Ac und $1,35 \cdot 10^{18}$ dpm $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$. Das ist umgerechnet eine Masse von 12,6 kg ^{227}Ac oder 8,4 kg $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im gesamten Ozean.

Alternativ kann die Menge von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Ozean auch auf der Grundlage der in Abschnitt 2.2 berechneten Flüsse erfolgen. Das Inventar kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$(19) \quad I = \frac{J}{\lambda}$$

I : Inventar

J : Flußrate

λ : Zerfallskonstante

Einen Fluß von 800 dpm/m²*a für Tiefseesedimente (nach Abschnitt 2.2) vorausgesetzt, ergibt sich ein Inventar von ca. 25000 dpm/m². Das entspricht einer Gesamtmenge im Ozean befindlichen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ von ca. 50 kg oder einer mittleren Aktivität von ca. 6,2 dpm/m³. Für den Schelf erhält man, einen Fluß von 85 dpm/m²*a

vorausgesetzt, ein Inventar von 2670 dpm/m². Das entspricht einem mittleren Actiniumgehalt der Schelfmeere von ca. 2,7 dpm/m², da den Modellberechnungen eine Tiefe der Schelfmeere von 100 m zugrundegelegt war.

Die Schätzung auf der Basis des Flußmodells liegt etwa um Faktor 6 über den gemessenen Konzentrationen, sowohl für die Tiefsee als auch für Schelfwasser. Die nach den Modellergebnissen zu erwartende mittlere ²²⁷Ac-Konzentration wird nicht einmal von den höchsten gemessenen Werten erreicht. Selbst wenn man die Ungenauigkeit der Schätzung auf Grundlage der Messungen berücksichtigt, folgt daraus, daß die in Abschnitt 2.2 berechneten Flüsse zu hoch sind. Die Abweichung ist allerdings nicht systematisch mit der Tiefe, da sich für Schelf wie Tiefsee gleichermaßen ein Faktor 6 ergibt.

Die Überschätzung der Flüsse durch das Modell kann verschiedene Ursachen haben.

1. Die mittlere ²³¹Pa-Konzentration von 2,8 dpm/g (Yang et al. 1986) für Tiefseesedimente liegt deutlich zu hoch.
2. Die Bioturbationsrate aus Middelburg et al. (1997) ist zu hoch.
3. Die Modellannahme, daß das ganze Sedimentprofil bioturbiert ist, führt zu dieser Überschätzung.

Mit dem Vorliegen von weiteren Daten von ²²⁷Ac auch aus dem Sediment wird eine genauere Eingrenzung der Ursache der Abweichung möglich sein. Bis dahin muß die Schätzung auf der Grundlage der Messungen als der derzeit genaueste Wert angesehen werden. Danach ist die mittlere Konzentration von ²²⁷Ac im Ozean ca. 1,5 dpm/m³ bzw. $9 \cdot 10^{-18}$ g/l und die Gesamtmenge ²²⁷Ac im Ozean etwa 12,6 kg. Der Fehler der Schätzung ist nicht zu quantifizieren, da nicht klar ist, wie repräsentativ die bisher gemessenen Profile für den gesamten Ozean sind.

5.2 Anwendungen von ²²⁷Ac

In Abschnitt 2 konnte gezeigt werden, daß ²²⁷Ac im offenen Ozean ein, abgesehen vom radioaktiven Zerfall, konservativer Tracer mit einer dominanten Quelle am Tiefseeboden ist. Es ist zuverlässig meßbar (vgl. Abschnitt 3) und Messungen haben die Grundzüge seiner Verteilung gezeigt (vgl. Abschnitt 4). Damit sind die wesentlichen Voraussetzungen einer Anwendung als Tracer erfüllt. Die Merkmalskombination aus Halbwertszeit, konservativem Verhalten und Quelle in der Tiefsee stellt ein neues Werkzeug dar, das die Bearbeitung einer Reihe von Fragestellungen zur Ausbreitung von Stoffen im Ozean erlaubt. Wenig partikelreaktive Stoffe wie Actinium werden im

Ozean entweder über Advektion oder durch Mischung verteilt. Vor der Vorstellung der ausgewählten Anwendungen sollen diese Prozesse kurz skizziert werden.

Sowohl Advektion als auch Mischung tragen zur Ausbreitung von Stoffen im Ozean bei. Ihre Maße sind jedoch unterschiedlich. Während Strömungsgeschwindigkeiten als Strecke pro Zeiteinheit (m/s) angegeben werden, haben Mischungskoeffizienten die Dimension m^2/s . Diese Einheit, die aus der Herleitung der Diffusionskoeffizienten resultiert, kann mit der Vorstellung einer Ausbreitung über eine Fläche pro Zeiteinheit veranschaulicht werden.

Im Ozean ist der Übergang zwischen Advektion und Mischung fließend und vom Betrachtungsmaßstab abhängig. Im kleinsten Maßstab ist es molekulare Diffusion, die zu einem Transport von Stoffen im Ozean führt. Während ein einzelnes Molekül eine Strecke pro Zeiteinheit zurücklegt, die sich in m/s angeben ließe, ist bei der Betrachtung einer Gruppe von Molekülen eine Ausbreitung weg von einem Punkt zu beobachten, die im dreidimensionalen Fall einer Kugel entspricht und deren Oberfläche in m^2/s angegeben werden kann. Die molekulare Diffusion ist im Ozean von untergeordneter Bedeutung, da sie im Vergleich zu den übrigen Transportprozessen sehr langsam verläuft.

Im größeren Betrachtungsmaßstab sind es Turbulenzen im Wasser, die zu Transporten führen. Diese Wirbel entstehen z.B. durch Gezeiten, an Grenzflächen zu Atmosphäre und Meeresboden oder einfach an Grenzflächen zwischen unterschiedlich schnell bewegten Wasserkörpern. Mischung durch Turbulenzen läßt sich vereinfacht als Diffusion beschreiben und wird dann als *Eddy-Mischung* oder *Eddy-Diffusion* bezeichnet. Turbulenzen im Wasser gibt es in Größenordnungen von Zentimetern bis zu mehreren Zehnerkilometern. Während ein einzelner Wirbel für einen gewissen Zeitraum verfolgt werden kann und dabei eine Strecke zurücklegt (m/s), ist das Ergebnis der Wirbelbildung letztlich eine Mischung (als Resultat der Auflösung vieler Wirbel über einen längeren Zeitraum), die wiederum in cm^2/s angegeben wird. Diese Zahl ist der *Eddy-Diffusionskoeffizient* oder *Eddy-Mischungskoeffizient*. Der Wert für die *Eddy-Mischung* ist also abhängig vom Betrachtungsmaßstab. Im allgemeinen wird der Mischungskoeffizient größer mit dem betrachteten Raum- und Zeitausschnitt, da größere Turbulenzen mehr zur Mischung beitragen. Beim Vergleich von Mischungskoeffizienten, die über unterschiedliche Verfahren erhalten wurden, ist deshalb eine genaue Berücksichtigung des zugrundeliegenden räumlichen und zeitlichen Maßstabs zu beachten.

Der Ozean verhält sich hinsichtlich der Transporte nicht isotrop. Mischung und Advektion folgen bevorzugt Flächen gleicher Dichte, den Isopyknen. Die Mischung senkrecht zu den Isopyknen (diapyknisch) ist dabei um mehrere Größenordnungen kleiner als die Mischung parallel zu den Isopyknen (isopyknisch). Da die Isopyknen in erster Näherung horizontal liegen, wirkt isopyknische Mischung hauptsächlich horizontal, diapyknische Mischung vertikal. Auch eine geringe Neigung von Isopyknen führt jedoch dazu, daß isopyknische Mischung eine vertikale Komponente erhält. Dies gilt analog für Advektion. Zwar bewegt sich das Wasser bevorzugt entlang von Isopyknen und damit wesentlich schneller horizontal als vertikal, doch weist auch die Advektion in Gebieten mit geneigten Isopyknen eine vertikale Komponente auf. Die vertikale Komponente der Advektion ist der Auftrieb.

Die Verteilung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Ozean nach seiner Freisetzung aus dem Sediment wird durch diapyknische Mischung, isopyknische Mischung und Advektion gesteuert. Die im Folgenden vorgestellten Anwendungen von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ basieren alle auf dem Prinzip der Abschätzung einer der drei Größen unter Quantifizierung oder Vernachlässigung der anderen beiden Größen.

5.2.1 Diapyknische Mischung, Energieflüsse und Schadstofftransport in der Tiefsee

Die Mischung von Wasser in der Tiefsee ist gegenwärtig aus verschiedenen Gründen Gegenstand wissenschaftlichen Interesses. Der Meeresboden wird zunehmend zu einem Wirtschaftsraum des Menschen. Der untermeerische Abbau von Erzen (Manganknollen, "schwarze Raucher"), der geplante Abbau von Methanhydrat, die Entsorgung von Kohlendioxid in der Tiefsee oder die Diskussion über atomare Endlager in Tiefseesedimenten implizieren Eingriffe in den Naturhaushalt, deren Konsequenzen nur aufgrund einer genauen Kenntnis der Ausbreitung von Stoffen am Meeresboden abgeschätzt werden können. ^{227}Ac kann eingesetzt werden, um die Ausbreitung gelöster Stoffe aus diffusen Quellen zu modellieren. Die Zeitinformation des Tracers erlaubt Aussagen darüber, wie schnell sich Stoffeinträge in der Tiefsee vertikal ausbreiten.

Eine verwandte Frage ist der Verbleib der der Erde über Gezeitenkräfte zugeführten Energie. Diese Energie hat Auswirkungen auf die globale Zirkulation der Ozeane (Wunsch 2000, Egbert und Ray 2000), und eine entscheidende Rolle scheint bei dem Prozeß der Energieumverteilung die Mischung in der Tiefsee an Stellen mit rauher Topographie zu spielen (Wunsch 2000, Ledwell et al. 2000). Die Bestimmung diapyknischer Mischungskoeffizienten mit Hilfe von ^{227}Ac (Nozaki 1984) kann zur

Beantwortung dieser Frage einen wertvollen Beitrag liefern. Ein ^{227}Ac -Profilschnitt, z.B. über den Mittelatlantischen Rücken, könnte die Quantifizierung der vertikalen Mischung in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeit ermöglichen. Da angenommen wird, daß die vertikale Zirkulation des Ozeans auch von der vertikalen Mischung durch Gezeiten abhängt, ist so eine Verbesserung des Verständnisses der globalen Zirkulation der Ozeane zu erwarten.

Beide oben vorgestellten Fragen bestehen letztlich in der genaueren Bestimmung diapyknischer Mischung. Am Beispiel der hier gewonnenen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Profile soll nun gezeigt werden, wie diapyknische *Eddy*-Mischungskoeffizienten mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu berechnen sind. Die Berechnung folgt Broecker und Peng (1982) sowie Nozaki (1984). Grundlage der Berechnung diapyknischer *Eddy*-Mischungskoeffizienten ist die Halbwertstiefe, das ist die Tiefe, nach der die Aktivität des Tracers auf die Hälfte zurückgegangen ist. Große Halbwertstiefen entsprechen schneller Mischung, niedrige Halbwertstiefen langsamer Mischung.

Aus den beiden bodennächsten Werten des Profils im Südostpazifik (4510 m, $3,48 \pm 0,26$ dpm/m³ und 3010 m, $0,27 \pm 0,08$ dpm/m³) läßt sich nach Broecker und Peng (1982) eine Halbwertstiefe von ca. 400 m berechnen (Nozaki 1993 im Nordpazifik: 1000 m). Daraus ergibt sich ein vertikaler *Eddy*-Mischungskoeffizient D von ca. $3,4$ cm²/s:

$$(20) \quad D = \frac{z_{1/2}^2}{0,693 * t_{1/2}}$$

D : vertikaler *Eddy*-Mischungskoeffizient

$z_{1/2}$: Tiefe, nach der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ auf die Hälfte zurückgegangen ist

$t_{1/2}$: Halbwertszeit des Tracers (21,77 Jahre)

Da D nicht konstant mit der Tiefe ist und das obige Profil keine entsprechende Auflösung hat, um Variationen in D mit der Tiefe zu berechnen, kann der erhaltene Wert nur im Hinblick auf das untersuchte Tiefenintervall zwischen 4510 und 3010 m gesehen werden. Eine höhere vertikale Auflösung könnte unterschiedliche Werte für bodennähere und bodenfernere Intervalle zwischen 4510 und 3010 m ergeben. $3,4$ cm²/s sind im Vergleich zu den von Nozaki (1993) ermittelten 20 cm²/s gering und sprechen für eine geringe diapyknische Mischung an dieser Stelle.

Die Berechnung diapyknischer *Eddy*-Mischungskoeffizienten auf diese Art erfordert die Annahme, daß kein lateraler Eintrag von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ durch Advektion oder isopyknische Mischung erfolgt und kein Verlust durch andere Prozesse als den Zerfall erfolgt. Wo diese Annahme nicht gerechtfertigt ist, ist auch die Berechnung von D ohne

Berücksichtigung dieser Prozesse unangebracht. Dies gilt z.B. für das Profil in der Arktis, in dem in der Tiefsee kein $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zu messen ist.

Ebenso sind die Ergebnisse für die Drake Passage mit Vorsicht zu betrachten. Hier ergibt sich für die Tiefe zwischen 3500 m und 2500 m ein Wert von $z_{1/2} = 2870$ m (durch lineare Extrapolation), was einem D von $173 \text{ cm}^2/\text{s}$ entspricht. Für die Tiefe zwischen 2500 m und 1500 m ergibt sich dagegen nur eine Halbwertstiefe von 593 m ($D = 7,4 \text{ cm}^2/\text{s}$). Derartige Schwankungen von D sind in der Drake Passage vor dem Hintergrund der schnellen lateralen Transporte in dieser Region zu sehen. Hier müßte die Advektion mitberücksichtigt werden, um zuverlässige diapykische Mischungskoeffizienten zu erhalten. Hierfür ist die horizontale und vertikale Auflösung der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Daten derzeit nicht ausreichend.

Das Profil PS2600 liegt ebenfalls in einem Bereich ausgeprägter horizontaler und vertikaler Strömungen. Zwischen 4885 m und 3500 m beträgt die Halbwertstiefe 977 m ($D = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$), zwischen 3500 und 2000 m 2945 m ($D = 182 \text{ cm}^2/\text{s}$), zwischen 2000 m und 270 m 1094 m ($D = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$). Auch diese theoretischen Werte für D sind stark durch Advektion beeinflusst und können nicht herangezogen werden, um eine Aussage über diapykische Mischung an dieser Stelle zu treffen.

In noch stärkerem Maße gilt das für die Station im Weddellwirbel, da an dieser Stelle mit einer sehr ausgeprägten vertikalen Komponente der Advektion zu rechnen ist. Berechnet man den zugehörigen vertikalen *Eddy*-Mischungskoeffizienten, so erhält man für die unteren 1000 m $21 \text{ cm}^2/\text{s}$, für die Tiefe von 4300 bis 3500 m $13 \text{ cm}^2/\text{s}$ und für die Tiefe von 3500 bis 1700 m $68 \text{ cm}^2/\text{s}$. Für geringere Tiefen ist eine Berechnung nicht mehr möglich, da $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ nicht mehr signifikant abnimmt. Während der Wert für die unteren 1000 m plausibel erscheint und der Wert für 4300-3500 m für die mittlere Wassersäule zwar hoch, aber nicht undenkbar erscheint, ist ein Koeffizient von $68 \text{ cm}^2/\text{s}$ zwischen 3500 m und 1700 m unrealistisch, wie ein Vergleich mit Literaturdaten zeigt (Broecker und Peng 1982; Sarmiento et al. 1982). Auch Rutgers van der Loeff (1994) berechnet auf der Basis von ^{228}Ra einen diapykischen Mischungskoeffizienten von $50\text{-}70 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ und kommt zu dem Schluß, daß dieser Wert unrealistisch hoch ist und daher nur Advektion und isopyknische Mischung zur Erklärung der Radiumverteilung in Frage kommen. Hier ist der Anteil der diapykischen Mischung an der Steuerung der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Verteilung so gering, daß er in erster Näherung vernachlässigt werden kann und aus $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ auf die Geschwindigkeit der Advektion geschlossen werden kann (vgl. 5.2.3).

Die Verteilung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ resultiert stets aus dem Zusammenspiel von diapyknischer Mischung, isopyknischer Mischung und Advektion. Die Berechnung diapyknischer Mischung auf der Grundlage von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ setzt daher entweder voraus, daß isopyknische Mischung und Advektion vernachlässigt werden können, oder die drei Größen müssen simultan bestimmt werden (vgl. 5.2.4). Sind allerdings Werte für isopyknische Mischung und Advektion auf anderem Wege zu gewinnen, so kann $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ einen hervorragenden Beitrag zu einer genaueren Bestimmung der diapyknischen Mischung liefern.

5.2.2 Einträge von Nähr- und Spurenstoffen in den Antarktischen Zirkumpolarstrom

Eine weitere mögliche Anwendung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ ist die Identifikation von Nähr- und Spurenstoffeinträgen durch Auftrieb von Tiefenwasser. Die Rolle dieses Prozesses im Nährstoffkreislauf wird vor dem Anwendungsbeispiel von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ kurz skizziert. Dabei werden der ACC und das Südpolarmeer aus zwei Gründen besonders berücksichtigt. Zum einen ist nur in dieser Region $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bis ins produktive oberflächennahe Wasser nachzuweisen. Zum anderen ist der ACC von besonderer Bedeutung für das gegenwärtige und vergangene Klimageschehen (z.B. Hoppema et al. 2000; Francois et al. 1997; Kumar et al. 1995).

Der größte Teil des pflanzlichen Lebens im Ozean ist an die lichtdurchfluteten oberen ca. 100 m, die euphotische Zone des Meeres, gebunden. Zu ihrem Wachstum benötigen die Algen als Primärproduzenten organischen Materials eine Vielzahl von Stoffen, die sie dem sie umgebenden Wasser entziehen. Ein Teil der Algen sinkt nach Beendigung ihres Lebenszyklus in größere Meerestiefen ab, wo er teilweise unter Abgabe der Nährstoffe an das sie umgebende Wasser remineralisiert wird. Der der Auflösung widerstehende Teil sammelt sich als Sediment am Meeresboden und ist somit für lange Zeit dem ozeanischen Kreislauf entzogen. Sobald einer der essentiellen Nährstoffe in der euphotischen Zone fehlt, kommt das Algenwachstum zum Erliegen. Das Algenwachstum hängt wesentlich vom Eintrag an Nährstoffen in die euphotische Zone ab. Dieser Eintrag kann auf mehreren Wegen erfolgen.

Ein Teil kann über Staub, der von den Kontinenten in den Ozean eingetragen wird, nachgeliefert werden. Weiterhin stellen Flüsse und hydrothermale Quellen wichtige Nährstoffquellen für den Ozean dar. Der dritte Weg, für den Actinium als geeigneter Tracer in Frage kommt, ist der Auftrieb von Tiefenwasser. Die Bedeutung dieses Mechanismus wurde schon im Jahre 1906 von Nathanson („Über die Bedeutung vertikaler Wasserbewegungen für die Produktion des Planktons im Meere“) erkannt.

Durch die Auflösung absinkender Lebewesen sind die größeren Tiefen des Ozeans reich an gelösten Nährstoffen. Wenn solches Tiefenwasser durch Auftrieb an die Oberfläche kommt, bieten die mitgebrachten Nährstoffe die Voraussetzung für eine Algenblüte.

Während bei der häufigsten Auftriebsform, dem küstennahen Auftrieb, nur Wasser aus geringer Tiefe an die Oberfläche gebracht wird, ist im südlichen ACC und dem Weddellwirbel der Auftrieb aus sehr tiefen Quellen zu beobachten (Orsi et al. 1993). Der Gehalt an den wichtigsten Nährstoffen, besonders Silikat, ist dort so hoch, daß er das Wachstum des Phytoplanktons nicht limitiert. Da zu beobachten ist, daß die Nährstoffe im Oberflächenwasser des ACC und im Weddellwirbel nicht vollständig von Algen verbraucht werden, wurde in letzter Zeit die Rolle von Spurenelementen, insbesondere Eisen, als limitierendem Faktor diskutiert (Martin et al. 1990).

Die Abschätzung der jeweiligen Bedeutung der potentiellen Eisenquellen

- äolischer Eintrag
- Zufuhr von Wasser, das mit Kontinentalschelfen in Kontakt gestanden hat
- Auftrieb von Tiefenwasser

für den ACC bereitet noch große Probleme. Während zur Erkennung von Eisen aus äolischem Eintrag verschiedene terrigene Elemente in Frage kommen (z.B. ^{232}Th , Al) und zur Erkennung von Eiseneinträgen durch Schelfwasser derzeit ^{228}Ra eingesetzt wird (Hanfland, Dissertation in Vorbereitung), stand zum Nachweis von Eisen aus dem Auftrieb von Tiefenwasser ein geeigneter Tracer noch aus. Der Nachschub an Eisen durch den Eintrag von Tiefenwasser an die Meeresoberfläche ist nach Löscher et al. (1997) derzeit nur der Größenordnung nach abzuschätzen, scheint jedoch für den ACC die Hauptquelle zu sein. Einen noch größeren Anteil des Eiseneintrags schreiben Lefèvre und Watson (1999) dem Auftrieb im Südozean zu, über 99%. Bei bekannten Eisenkonzentrationen des CDW (Löscher et al. 1997) könnte mit Hilfe von Auftriebsraten der Fluß von Eisen in das Oberflächenwasser des Südozeans genauer abgeschätzt werden. ^{227}Ac könnte, da es aufgrund seiner Quellen spezifisch für Tiefenwasser ist, zur Identifikation von Eisen- und Nährstoffeinträgen durch tiefen Auftrieb herangezogen werden.

Der Profilschnitt durch den ACC (vgl. 4.5) bietet die Möglichkeit, die Eignung von ^{227}Ac für diese Fragestellung zu überprüfen. Die Nährstoffdaten Nitrat, Phosphat und Silikat zeigen dort bei 52°S den Auftrieb nährstoffreichen Tiefenwassers bis an die Oberfläche

an. Dieser Auftrieb findet seine Entsprechung in den Daten von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$. Die beste Übereinstimmung ergibt sich mit Nitrat und Phosphat, die ähnlich $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bei 52°S ein Maximum bei ca. 500 m Tiefe zeigen. Für Silikat, das aus größeren Tiefen stammt, ist die Entsprechung aufgrund des Zerfalls von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ aus dieser Tiefe weniger gut. Für gelöstes Eisen sind die Hinweise ambivalent: Während das Eisenmaximum bei ca. 500 m in $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ widerspiegelt wird, ist das weit höhere Maximum von Eisen bei 1000 m Tiefe nicht in $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ wiederzufinden. Das tiefe Eisenmaximum zeigt dagegen wieder Übereinstimmung mit Silikat.

Die enge Verknüpfung zwischen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ und den Nährstoffen, teilweise auch mit Eisen, zeigt die grundsätzliche Eignung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ als Indikator für kürzlich erfolgte Einträge von Tiefenwasser. Die Komplexität der hydrographischen Verhältnisse im Einflußbereich der Fronten des ACC läßt eine Trennung von lateralen und vertikalen Einträgen aufgrund eines zweidimensionalen Profilschnittes nicht zu. Ohne Vorliegen dreidimensionaler Meßfelder von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ zusammen mit detaillierten Daten zur Hydrographie sind hier nur qualitative Aussagen über Nährstoff- und Eiseneinträge aus dem Tiefenwasser möglich. ^{227}Ac kann im ACC also derzeit nur als Indikator für einen kürzlich erfolgten Eintrag von Tiefenwasser dienen. Für quantitative Aussagen müssen Messungen der Eisenkonzentrationen mit Auftriebsraten verknüpft werden.

5.2.3 Berechnung der Auftriebsgeschwindigkeit von Tiefenwasser

Der Auftrieb von Tiefenwasser spielt nicht nur für biologische Prozesse eine große Rolle. Auch der physikalische Austausch von Gasen und Wärme zwischen Ozean und Atmosphäre, ein wichtiger Prozeß für das Weltklima, hängt eng mit diesem Phänomen zusammen. In großem Maßstab findet ein solcher Austausch zwischen Atmosphäre und Tiefenwasser nur in den Polargebieten auf. Nur bei Meereisbildung kommt es zur Entstehung so salzreicher und dichter Wassermassen, daß diese bis in größere Tiefen absinken können und ein atmosphärisches Signal in die Tiefsee einbringen. Im größten Maßstab findet dieser Prozeß im Weddellmeer statt. Das im Südpolarmeer gebildete AABW nimmt 30% des Volumens des Weltmeeres ein, und etwa 70% dieser Wassermasse werden im Weddellwirbel gebildet (Fahrbach 1993). Damit ist diese Region als eine Schlüsselstelle für den globalen Wärme- und Stofftransport zu sehen. Im Ausgleich für das zum Boden sinkende Wasser strömt an anderer Stelle Tiefenwasser nach oben. Verschiedene Arbeiten deuten darauf hin, daß ein Großteil dieses Prozesses im östlichen Weddellwirbel stattfindet (Whitworth und Nowlin 1987; Muench 1991; Orsi et al. 1993; Gouretski und Danilov 1993; Schröder und Fahrbach 1999).

Über den Zerfall von ^{227}Ac auf seinem Weg in den Weddellwirbel kann auf die Geschwindigkeit, mit der dieser Auftrieb erfolgt, geschlossen werden. Im Weddellwirbel (Abschnitt 4.7) wurden hohe $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte über die gesamte Wassersäule bis nahe der Oberfläche gemessen. In einer ersten Überschlagsrechnung kann eine Mindestgeschwindigkeit für den Auftrieb im Weddellwirbel allein aufgrund des oberflächennächsten Werts getroffen werden: Bodennah wurden im Südpolarmeer mehrfach ca. 4 dpm/m^3 $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ gemessen. Der oberflächennächste Wert im Weddellmeer liegt bei $0,5 \text{ dpm/m}^3$, also $1/8$ der erwarteten Ausgangskonzentration. Das entspricht 3 Halbwertszeiten oder ca. 66 Jahren Transportdauer, bis das Tiefenwasser auf 300 m im Weddellwirbel aufgestiegen ist. Daraus ergibt sich in erster Näherung eine Auftriebsgeschwindigkeit von etwa 60 m/Jahr.

Im folgenden sollen die hydrographischen Gegebenheiten der Region mitberücksichtigt werden, um eine zuverlässigere Schätzung zu erhalten. Hierzu wird angenommen, daß das die Lokation von PS2600-4 die Quellregion für die Wassermassen bei PS2579-2 im zentralen Weddellwirbel ist. Um die Zirkulationsverhältnisse zu veranschaulichen, wurden Modellergebnisse von Usbeck (1999) gewählt (Abbildung 35).

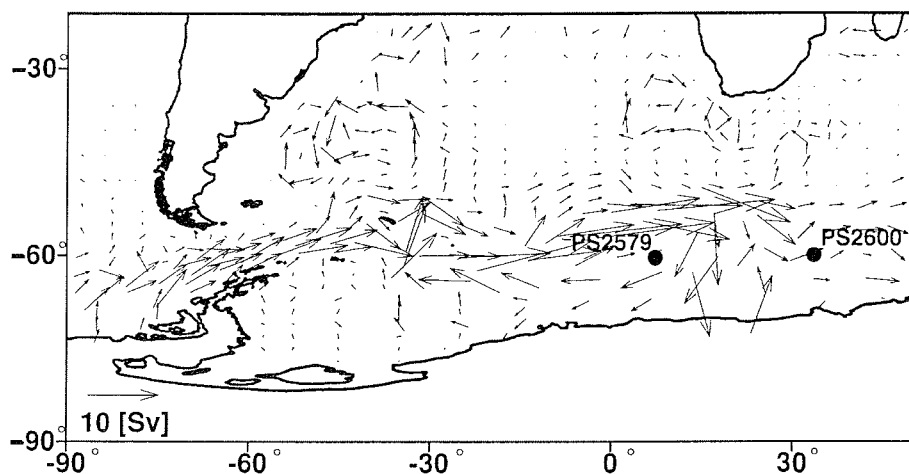


Abbildung 35: Transporte auf der Isopykne $\sigma_t=45,9$ aus Inversmodellierung (Usbeck 1999). Zusätzlich ist die Position der Profile PS2600-4 und PS2579-2 eingezeichnet. Man erkennt die ausgeprägte Advektion von Tiefenwasser von Osten in den Weddellwirbel. PS2600 liegt allerdings östlich der erwarteten Quelle für Station PS2579.

Die modellierten Strömungsverhältnisse ergeben, daß Station PS2600 südöstlich der zu erwartenden Quellregion für PS2579 liegt. Da jedoch der Vergleich der Profile aus

der Drake Passage und PS2600 zeigt, daß $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ aufgrund der schnellen Strömung innerhalb gleicher Wassermassen im Atlantischen Sektor des ACC kaum variiert, ist nicht zu erwarten, daß die $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen bei PS2600 signifikant anders sind als an der tatsächlichen Quelle für den zentralen Weddellwirbel. Ein Vergleich der hydrographischen Daten für PS2600 mit Daten von der nach Abbildung 35 zu erwartenden Quellregion von etwa 57°S 15°E (Daten aus Schröder und Fahrbach 1999) ergab, daß gleiche Isopyknen bei PS2600 etwas flacher zu finden sind als bei der tatsächlichen Quelle. Demnach wird die Annahme, daß PS2600 die Quellregion für PS2579 ist, zu einer leichten Unterschätzung der Auftriebsgeschwindigkeit führen.

Unter der Annahme, daß Wasser gleicher Dichte bei den Stationen PS2600 und PS2579 die gleiche Wassermasse repräsentiert (LCDW bzw. WDW), und daß die Abnahme von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ nur durch Zerfall bedingt ist, kann aus den beiden Profilen die Auftriebsgeschwindigkeit berechnet werden. Zunächst wurde für das Quellgebiet (PS2600) der zu einer Isopykne zugehörige Wert für $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ abgelesen. Dann wurde für die gleiche Isopykne im Zielgebiet (Weddellwirbel) ebenfalls $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bestimmt; falls für die genaue Dichte kein Wert vorlag, mußte über ein geeignetes Interpolationsverfahren (für flachere Tiefen reicht wegen des geringen Gradienten in $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ lineare Interpolation) ein Wert für diese Isopykne berechnet werden.

Die Transportdauer T vom Quell- ins Zielgebiet errechnet sich über den radioaktiven Zerfall:

$$(21) \quad T = \frac{-\ln\left(\frac{A}{A_0}\right)}{\lambda}$$

T : Transportdauer

A : $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivität im Zielgebiet

A_0 : $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivität im Quellgebiet

λ : Zerfallskonstante von ^{227}Ac

Die Tiefendifferenz zwischen gleichen Isopyknen im Quell- und Zielgebiet entspricht der vertikal zurückgelegten Wegstrecke einer Wassermasse. Die Differenz ist in Tabelle 9 für verschiedene Isopyknen als Δz angegeben. Durch Division der berechneten Tiefendifferenz durch die Transportdauer wird die Auftriebsgeschwindigkeit w erhalten, mit der Wasser aus dem Quellgebiet ins Zielgebiet aufsteigt.

$$(22) \quad w = \frac{\Delta z}{T}$$

Die so berechneten Werte für die beiden hier betrachteten Profile sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Für das vorliegende Beispiel wurde die Berechnung für drei Isopyknen durchgeführt. Für Wassertiefen kleiner ~750 m im Zielgebiet sind keine aussagekräftigen Werte zu erhalten, da die Unterschiede in $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ in Quell- und Zielgebiet nicht signifikant sind oder die $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen im Zielgebiet signifikant höher sind als im angenommenen Quellgebiet. Letzteres ist so zu erklären, daß die tatsächliche Quelle für das oberflächennahe Wasser im Weddellwirbel, das LCDW, eine höhere $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentration aufweist als das in der entsprechenden Tiefe bei Station 2600 vorliegende UCDW.

Tabelle 9: Linear interpolierte $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Konzentrationen in Quell- und Zielgebiet für verschiedene Isopyknen und daraus berechnete Auftriebsgeschwindigkeiten. Der Wert für die Isopykne 27,83 basiert auf einem nicht signifikanten Unterschied zwischen den beiden Profilen und ist in Klammern dargestellt.

Isopykne σ_θ	$^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bei PS2600 in dpm/m^3	$^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bei PS2579 in dpm/m^3	Tiefe bei PS2600 in m	Tiefe bei PS2579 in m	Auftriebs- geschwin- digkeit w in m/a	Fehler von w in m/a
27,83	0,486	0,466	1168	500	(511,5)	(± 1744)
27,84	0,784	0,503	2000	1250	53,6	$\pm 17,1$
27,85	0,963	0,672	3000	2340	55,7	$\pm 22,0$

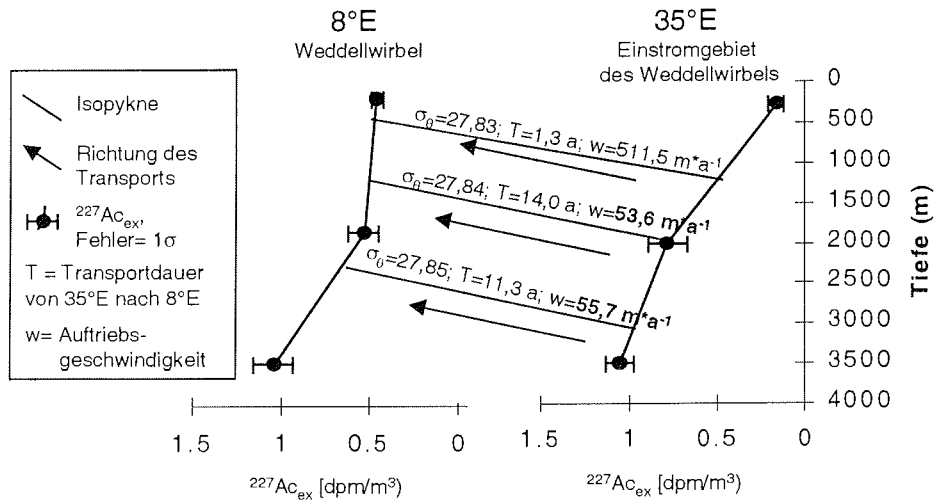


Abbildung 36: Grafische Darstellung des Modells zur Berechnung von Auftriebsgeschwindigkeiten

Für die Isopyknen 27,84 und 27,85 wurde mit dieser Berechnung ein Wert von 53,6 bzw. 55,7 m*a⁻¹ erhalten, nahe bei dem Wert der ersten Überslagsrechnung von 60 m*a⁻¹. Die Ähnlichkeit der Werte für die Isopyknen 27,84 und 27,85, die über lineare Interpolation aus verschiedenen Meßpunkten erhalten wurde, sowie die Ähnlichkeit mit der ersten Überslagsrechnung zeigt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse trotz verschiedener Ausgangsdaten.

Aufgrund des Zählfehlers der Ausgangsdaten sind die Auftriebsgeschwindigkeiten ebenfalls mit einem Fehler behaftet. Da sich die Transportdauer T aus Gleichung (21) errechnet, ist der Fehler von T nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$(23) \quad Err_T = \pm \sqrt{\left(\frac{a_0}{\lambda A_0}\right)^2 + \left(\frac{-a}{\lambda A}\right)^2}$$

Err_T : absoluter Fehler von T
 a_0 : absoluter Fehler von A_0
 a : absoluter Fehler von A

Da die jeweiligen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivitäten über lineare Interpolation erhalten wurden, kann kein genauer Fehler für diese Werte angegeben werden. Für die weitere Berechnung wurde daher ein typischer Fehler der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Aktivitäten A und A_0 von 10% angenommen. Als Fehler von T ergibt sich dann ein Wert von 4,44 Jahren.

Daraus ergibt sich ein Fehler der Transportgeschwindigkeiten nach der Gleichung:

$$(24) \quad Err_w = \frac{\Delta z}{T^2} * Err_T$$

Diese Fehlerabschätzung (Ergebnisse in Tabelle 9) gibt allein die Unsicherheiten durch den statistischen Fehler bei der Messung wieder. Um den Einfluß möglicher Verletzungen der Annahmen auf das Ergebnis abzuschätzen, sollen diese im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

5.2.3.1 Annahmen für die Berechnung von Auftriebsgeschwindigkeiten mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$

Die berechneten Geschwindigkeiten basieren auf verschiedenen Annahmen, die hier speziell im Hinblick auf ihre Auswirkungen im Falle einer Verletzung diskutiert werden.

1. Die gemessenen $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte sind die wahren Werte.

Wie im Methodenteil diskutiert, besteht die Möglichkeit von Verlusten an ^{227}Ac zu Beginn der Probenverarbeitung, die dazu führen kann, daß der wahre $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Wert unterschätzt wird. Beträfe dieser Verlust die Messung in der Einstromregion, nicht aber die Messung im Weddellwirbel, so läge die berechnete Auftriebsgeschwindigkeit zu hoch. Dieser Fall ist allerdings unwahrscheinlich, da der $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Wert für das LCDW in zwei Tiefen im Einstromgebiet gemessen wurde und darüberhinaus in zwei Tiefen in der Drake Passage bestätigt wurde. Läge hingegen nur der Wert im Weddellwirbel selbst zu niedrig, so wäre die berechnete Auftriebsgeschwindigkeit zu niedrig und stellte damit immer noch einen Mindestwert dar.

2. Die $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Verteilung in der oberen Wassersäule des Weddellwirbels wird nur von Advektion gesteuert.

Als weitere steuernde Größen kommen isopyknische Mischung (eines Signals vom Kontinentalhang), diapyknische Mischung sowie die Entfernung von ^{227}Ac aus der Wassersäule durch Partikel in Frage. Die mögliche Rolle der Mischung wurde diskutiert und tritt gegenüber der Advektion zurück. Sowohl diapyknische als auch isopyknische Mischung würden zu einer Überschätzung der Auftriebsgeschwindigkeit führen. Das Problem, daß zur Bestimmung einer der drei Größen isopyknischer Mischung, diapyknischer Mischung und Advektion immer die beiden jeweils anderen ausgeschlossen werden müssen, ist grundsätzlicher Natur (Sarmiento et al. 1982;

Nozaki 1993). Hier böte sich ein Ansatz mit mehreren konservativen Tracern an (analog Ku und Luo 1994), um die entsprechende Gleichung mit drei Unbekannten zu lösen. Scavenging kann in dieser Region aufgrund der geringen ^{227}Ac -Gehalte auf Partikeln bei Station PS2600-4 ausgeschlossen werden.

3. Die Advektion erfolgt tatsächlich in der angenommenen Richtung.

Wie bereits weiter oben diskutiert, ist dies nicht genau der Fall. Ein Teil des Auftriebs hat bei PS2600-4 im Vergleich zur tatsächlichen Quellregion bereits stattgefunden. Daraus ergibt sich tendenziell eine Unterschätzung der Auftriebsgeschwindigkeit.

Die Überschlagsrechnung vom Beginn des Abschnitts ist die robustere Rechnung. Sie kann nur dann weit vom wahren Wert entfernt sein, wenn entweder an der Quelle deutlich andere $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Werte als 4 dpm/m^3 auftreten oder wenn diapyknische Mischung einen sehr hohen Beitrag zum $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Transport an dieser Stelle leistet. Auch diese Berechnung hat einen Wert von ca. 60 m/Jahr ergeben.

5.2.3.2 Vergleich der erhaltenen Geschwindigkeiten mit bisherigen Abschätzungen

Eine Reihe von Schätzungen der Auftriebsgeschwindigkeit im Weddellmeer bietet Gordon (Gordon et al. 1977; Gordon et al. 1984; Gordon und Huber 1990). Auf der Basis von Berechnungen zur Geostrophie berechnet er einen jährlichen Auftrieb von 31 m/Jahr (Gordon et al. 1977) für den gesamten Weddellwirbel. Eine spätere Berechnung auf der Basis von Wärmeflußdaten entlang des Greenwich-Meridians ergab einen jährlichen Auftrieb von 27 m/Jahr. Gordon et al. (1990) geben, erneut hauptsächlich auf der Basis von Wärmeflußdaten, einen Wert von $45 \text{ m} \pm 9 \text{ m}$ pro Jahr an. Letztere Zahl wird jedoch von den Autoren als sehr empfindlich auf die zugrundegelegten Sauerstoffmessungen eingestuft (eine 1%ige Änderung in der Sauerstoffsättigung bewirkt eine 10%ige Änderung in der Auftriebsrate).

Hoppema et al. (1995) berechnen aus TCO_2 - und Sauerstoffkonzentrationsdifferenzen zwischen Winter und Sommer einen erforderlichen Nachschub an WDW von ca. 30 m/Jahr. Hoppema et al. (1999) berechnen, erneut auf der Basis von TCO_2 , einen Wert von 35 m/Jahr.

Rutgers van der Loeff (1994) kommt aufgrund der ^{228}Ra -Verteilung im Weddellwirbel zu dem Schluß, daß der Auftrieb langsam sein muß im Verhältnis zur Halbwertszeit von ^{228}Ra (5,8 Jahre).

Usbeck (1999) erhält in einem Inversmodell, welches aufgrund von Temperatur-, Salzgehalts- und Nährstoffverteilungen ein Strömungsfeld berechnet, lokale Auftriebsgeschwindigkeiten von bis zu ca. 200 m/Jahr. Im östlichen Weddellwirbel werden Auftriebsraten von 50-100 m/Jahr berechnet. Die Werte variieren mit der Tiefe.

Um diese Auftriebsgeschwindigkeiten aus früheren Berechnungen miteinander und mit den hier vorgestellten Ergebnissen vergleichen zu können, muß zunächst der räumliche und zeitliche Maßstab, auf den sich die jeweiligen Ergebnisse beziehen, diskutiert werden. Die vorgestellten Werte sind, mit Ausnahme von Usbeck (1999), Abschätzungen für den gesamten Weddellwirbel, oft auf der Basis eines oder mehrerer Schnitte entlang des Greenwich-Meridians. Sie schließen nicht aus, daß lokal deutlich höhere oder niedrigere Werte auftreten, die erst im Mittel den berechneten integrierten Wert ergeben. Die Werte von Usbeck (1999) sind räumlich differenzierter. Im Modell treten im Weddellwirbel Auftriebsraten von ca. -300 bis +200 m/Jahr auf, die Auftriebsgeschwindigkeiten werden auch nach der jeweiligen Tiefe unterschieden. Eine mittlere Auftriebsrate wird in Usbeck (1999) nicht gegeben, so daß diese Werte nicht direkt vergleichbar sind mit den Werten anderer Autoren. Sie geben allerdings einen deutlichen Hinweis, daß vertikale Wasserbewegungen im Weddellwirbel räumlich differenziert werden müssen.

Es gibt Hinweise darauf, daß es episodische Ereignisse der Tiefenwasserbildung gibt (Martinson 1991), die mit der Bildung von Polynyas in Zusammenhang stehen. Die Polynyabildung im Weddellwirbel erfolgt nicht jährlich, sondern in einem derzeit aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraums nicht quantifizierbaren Rhythmus. Die plötzliche Bildung großer Mengen von Tiefenwasser muß an anderer Stelle einen entsprechenden Auftrieb von Wasser mit sich bringen. Damit wären neben annuellen Schwankungen auch längerperiodische Variationen der Auftriebsrate zu erwarten.

Darüberhinaus gibt es vielfältige Hinweise auf das Vorkommen von *Eddies* im östlichen Weddellwirbel (Gouretski und Danilov 1993; Gouretski und Danilov 1994; Muench 1991; Schröder und Fahrbach 1999), die lokal Gebiete deutlich erhöhter Auftriebsgeschwindigkeiten darstellen.

Die hier vorgestellte Berechnung der Auftriebsgeschwindigkeit im östlichen Weddellwirbel basiert auf zwei Tiefenprofilen. Die Nähe des Ergebnisses von ca. 55 m/Jahr zu den Berechnungen von Gordon, Hoppema und Rutgers van der Loeff (zwischen 27 und 45 m/Jahr) deutet darauf hin, daß der erhaltene Wert als langjähriges Mittel zu sehen ist. Seine Lage im Osten des Wirbels kann erklären, daß er über den globalen Schätzungen für den gesamten Weddellwirbel liegt, da im Osten

der Hauptteil des Auftriebs erfolgt. Die hier vorgestellte Berechnung hat lediglich exemplarischen Charakter. Die Methode der Bestimmung von Auftriebsgeschwindigkeiten mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ birgt grundsätzlich das Potential, bei Vorliegen von mehr Meßwerten in Kombination mit weiteren Größen (Temperatur-, Salzgehalts-, Nährstoffdaten) ein detailliertes Bild der räumlichen Verteilung des tiefen Auftriebs im Weddellwirbel und im Süden des ACC zu geben. Damit kann dieses Verfahren einen wichtigen Beitrag zum Verständnis klimarelevanter Prozesse im Südpolarmeer liefern.

5.2.3.3 Die Rolle der Auftriebsgeschwindigkeit für das Sedimentationsgeschehen

Der ACC und der Weddellwirbel unterscheiden sich hinsichtlich der sie unterlagernden Sedimente. Während unter dem ACC und an den kontinentalen Rändern des Weddellmeers stellenweise schnellakkumulierende (DeMaster 1981; Schlüter et al. 1998), opalreiche (Lisitzin 1985) Sedimente zu finden sind, sind im zentralen Weddellmeer extrem langsam akkumulierende Sedimente, z.B. 4 mm/ka im Sedimentkern PS1507 und 2,6 mm/ka bei PS 1508 (Walter et al. 2000), mit hohem Terrigenanteil zu finden. Nur ein Teil dieser Unterschiede ist durch unterschiedliche Produktion zu erklären, auch unterschiedliche Erhaltung in ACC und Weddellwirbel spielt hierbei eine wichtige Rolle. Im folgenden soll diskutiert werden, ob durch Auftrieb verlangsamte Sedimentation und hierdurch verstärkte Lösung als Ursache für die niedrigen Akkumulationsraten im Weddellmeer in Frage kommen.

Satellitenbilder der Region (SEAWIFS, Coastal Zone Colour Scanner vgl. Abbildung 37) zeigen im ACC regelmäßig hohe Chlorophyllgehalte, besonders im Bereich der Fronten, die mit der Lage des Opalgürtels etwa übereinstimmen. Doch auch im Weddellmeer sind gelegentlich hohe Chlorophyllgehalte zu beobachten, insbesondere nördlich des Ronne/Filchner-Schelfeises (wobei hier aufgrund der extrem polnahen Lage oder der kurzen sommerlichen Meßperiode auch ein Meßartefakt denkbar ist) und 1998 auch im zentralen Weddellmeer. Zwar treten die Blüten dort unregelmäßig und fleckenhaft auf, doch sind die Chlorophyllgehalte im Oberflächenwasser dann durchaus dem ACC vergleichbar (Abbildung 37).

Die Gewinnung von zuverlässigen Zahlen zum Massenfluß im Weddellwirbel ist durch extreme saisonale und interannuelle Schwankungen im Partikelfluß schwierig (Abelmann und Gersonde 1991, Fischer et al. 1988, Wefer et al. 1990). Diese

Schwankungen erschweren die Gewinnung eines Mittelwerts auf Grundlage der wenigen Daten.

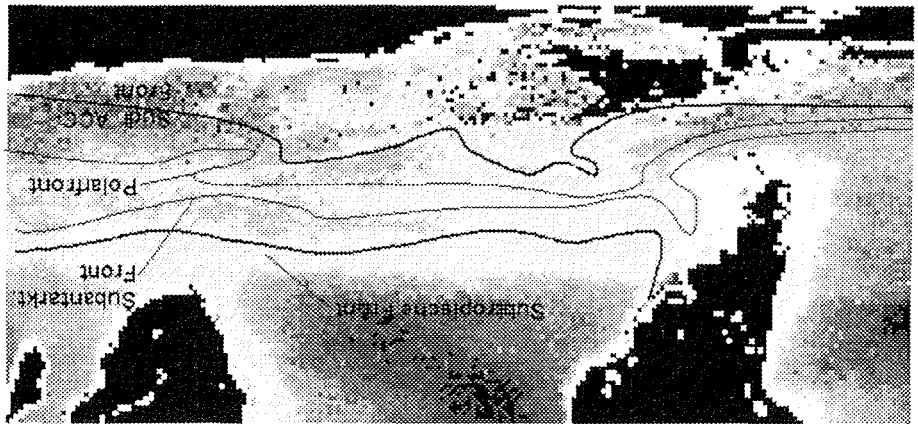


Abbildung 37: Satellitenbild der Chlorophyllverteilung an der Meeresoberfläche im Atlantischen Sektor des Südozeans (SEAWIFS Project 1998). Der annähernde Verlauf der Fronten ist nach Orsi et al. (1995) eingezeichnet. Hell = hohe Konzentration, Dunkel = niedrige Konzentration

Messungen der Diatomeenkonzentration in der Wassersäule deuten darauf hin, daß im Weddellwirbel in den produktiven Sommermonaten zwar eine dem ACC vergleichbare Produktion stattfindet, eine flache Auflösung dieser Partikel jedoch zu geringen Flüssen zum Boden führt. Schon 1966 ergaben Messungen von Kozlova zur Diatomeenkonzentration im Oberflächenwasser bei 20°E höhere Werte für den Weddellwirbel als für den ACC (Kozlova 1966). In tieferen Wasserschieden kehrt sich das Bild um: Während bei 64°S nur 0,7% der Oberflächenkonzentration (Diatomeenzellen/m³) in 1000 m Tiefe wiederzufinden sind, sind es bei ca. 50°S schon 5,8%. Damit stellt sich die Sedimentverteilung im Südozean eher als ein Spiegel der Erhaltungs- denn der Produktionsbedingungen dar.

Diese Beobachtungen decken sich für den östlichen Weddellwirbel gut mit Modellberechnungen aus Temperatur-, Salzgehalts- und Nährstoffdaten (Usbeck 1999), die ebenfalls für eine maßgebliche Rolle der Erhaltung für das Sedimentationsmuster sprechen. Für den östlichen Teil des Weddellmeers ergibt sich im Modell eine dem ACC vergleichbare Exportproduktion (>133m). Das Modell ergibt, daß das Sedimentationsmuster im atlantischen Sektor des ACC und dem Weddellwirbel größtenteils durch unterschiedliche Erhaltungsbedingungen in der tieferen Wassersäule und am Boden bestimmt wird. Der Befund, daß die Erhaltung

eine maßgebliche Rolle bei der Überlieferung von biogenem Opal im Sediment spielt, ist vielfach bestätigt (Nelson und Goering 1977; van Bennekom et al. 1988; Leynaert et al. 1993; Bonn 1995; Schlüter 1990; Schlüter et al. 1998; Pondaven et al. 2000).

In der Literatur werden eine Reihe steuernder Größen der Opalerhaltung diskutiert (Tabelle 10). Auftrieb ist demnach nur eine von vielen möglichen Ursachen für eine geringe Erhaltung im Weddellwirbel. Da das Zusammenspiel der steuernden Größen im Weddellwirbel noch nicht geklärt ist, muß eine Untersuchung der möglichen Auswirkung von Auftrieb auf die Erhaltung eine Reihe vereinfachender Annahmen treffen.

Tabelle 10: Steuernde Größen der Opalerhaltung in der Wassersäule

Steuernde Größe	Quelle
Oberflächengröße; Al, Fe, Be-Gehalt des Meerwassers	Wollast 1974; Rickert 2000
Al-Gehalt in Diatomeen	van Bennekom et al. 1988
bakterieller Abbau, org. Ummantelung	Smetacek 1999 Bidle und Azam 1999
Silizifizierung	Kozlova 1966, Abelman und Gersonde 1991
Sinkgeschwindigkeit, über: -Größe der Diatomeen -Größe der Aggregate -Auftrieb	Kozlova 1966; Wollast, 1974; Krill: z. B. Gonzalez 1992; Cadée et al. 1992; Salpen: z.B. Bruland und Silver 1981; Perissinotto und Pakhomov 1998 Wollast 1974; diese Arbeit

Um den möglichen Einfluß von Auftrieb auf die Sedimentation beschreiben zu können, wurde ein stark vereinfachtes zeitabhängiges Modell für die Sedimentation von Opal entwickelt. Hierzu wurde die Lösung von Partikeln in der Wassersäule als Funktion der Zeit betrachtet.

$$(25) \quad J(t) = J(0) * c^t$$

J ist der nach einer Zeit t noch erhaltene Fluß zum Meeresboden. Die Konstante c gibt den jährlich nach der Lösung erhaltenen Anteil des Gesamtflusses wieder. Für Opal läßt sich c auf der Basis von Sinkgeschwindigkeit, Wassertiefe und Abschätzungen des

Exportproduktions/Fluß zum Boden-Verhältnisses berechnen, da sich die mittlere Residenzzeit in der Wassersäule über

$$(26) \quad t = \frac{z}{v}$$

(wobei t die mittlere Residenzzeit, z die Wassertiefe und v die Sinkgeschwindigkeit ist) ergibt. Setzt man $z = 4000$ m und eine mittlere Sinkgeschwindigkeit von ca. 1000 m/Jahr (nach Henderson et al. 1999) ein, so ergibt sich eine mittlere Residenzzeit der Partikel in der Wassersäule von etwa 4 Jahren. Die mittlere Sinkgeschwindigkeit nach Henderson et al. (1999) basiert auf Messungen partikelreaktiver Radionuklide und stellt einen integrierten Wert für den gesamten Partikelfluß dar. Real tritt ein breites Spektrum an Sinkgeschwindigkeiten auf. Dieser Umstand wird im Modell vernachlässigt und muß bei der Deutung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Nimmt man nun als Rechenbeispiel an, daß etwa 10% des aus der euphotischen Zone exportierten Opals den Boden erreichen (Pondaven et al. 2000), so ergibt sich ein Wert von ca. 0,56 für c , d.h. pro Jahr bleibt etwa die Hälfte des Opals erhalten. Ein ähnlicher Wert ergibt sich aus 12% Erhaltung für das westliche Weddellmeer nach Schlüter et al. 1998. Berechnet man c z.B. nach den Angaben von Leynaert et al. (1993), die angeben, daß im Weddellmeer nur 1% des produzierten Silikats eine Tiefe von 800 m erreicht, so erhält man einen Wert von 0,003. Für genaue Daten zur Lösungskinetik von Opal sei auf die Arbeit von Rickert (2000) verwiesen. Dort wird auch der Tatsache, daß die Lösung real keine einfache Funktion der Zeit ist, Rechnung getragen. Für verschiedene Werte für die Konstante c wurde die Auswirkung von Auftrieb auf die Erhaltung des Opals berechnet und in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Anteil der Exportproduktion aus der euphotischen Zone, der den Meeresboden erreicht, in Abhängigkeit von verschiedenen Lösungsraten und verschiedenen Auftriebsgeschwindigkeiten. Für Variante 1 wurde nach Pondaven et al. 2000 ein Produktions/Fluß zum Boden-Verhältnis von 10% angenommen. Variante 2 ist ein Kompromiß, der der verstärkten Lösung im Weddellwirbel Rechnung trägt. Hier wurde ein Produktions/Fluß zum Boden-Verhältnis von 0,8% angenommen. Variante 3 ist ein Extremwert, der der Arbeit von Leynaert et al. (1993) entnommen wurde. Er entspricht 1% Erhaltung in 800 m Tiefe.

		Auftriebsrate [m/Jahr]		
		0	55	100
Variante	Opalerhaltung (Konstante c)	Anteil der Exportproduktion aus der euphotischen Zone, der den Meeresboden erreicht		
1	0,56	9,8%	8,6%	7,6%
2	0,3	0,8%	0,61%	0,47%
3	0,003	$8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-10}$

Die Berechnungen ergeben, daß bei 1-10% Erhaltung (ohne Auftrieb) auch ein zusätzlicher Auftrieb von 55 m/Jahr keine merkliche Änderung im Fluß zum Boden bewirkt. Nur wenn eine extrem flache Remineralisierung, wie in Leynaert et al. (1993) beschrieben, eingesetzt wird, wirkt sich der Auftrieb auf die Erhaltung am Boden aus. Nimmt man einen Auftrieb von 100 m/Jahr an, so kann auch für Variante 2 schon ein Einfluß auf die Erhaltung am Boden festgestellt werden.

Die Aufgabe des vorgestellten Modells zur zeitabhängigen Erhaltung von Partikeln war nicht die Quantifizierung des Partikelflusses ins Sediment, sondern eine Abschätzung, ob Auftrieb eine Rolle für den Partikelfluß im Südpolarmeer spielen kann. Die für den östlichen Weddellwirbel auf der Basis von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ bestimmten Auftriebsraten haben, wenn man keine weiteren Besonderheiten der Opallösung im Weddellmeer annimmt, praktisch keinen Einfluß. Als alleinige Ursache für die schlechte Erhaltung biogenen Materials im Sediment des Weddellwirbels scheidet der Auftrieb damit aus. In Kombination mit anderen die Lösung begünstigenden Faktoren kann der Auftrieb von Tiefenwasser allerdings durchaus eine wesentliche Rolle bei der Erhaltung biogener Partikel in den Sedimenten des Weddellwirbels spielen.

Berücksichtigt man zusätzlich, daß statt einer mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit real ein breites Spektrum von Sinkgeschwindigkeiten zu erwarten ist, so muß für kleinste Partikel schon bei geringen Auftriebsraten mit einer verstärkten Lösung durch Auftrieb gerechnet werden. Eine Besonderheit des Weddellmeers ist die geringe Größe des dort vorkommenden Planktons. Verschiedene Autoren (Kozlova 1966; Silver et al. 1980; Gersonde mdl. Mitt.) stimmen darin überein, daß im Weddellmeer ungewöhnlich kleine Diatomeen sowie anderes silikatisches Nanoplankton (Silver et al. 1980) zu finden sind. Die Durchmesser werden bei Kozlova mit 3-4 μm für Diatomeen und bei Silver et al. mit 2,5-15 μm für anderes silikatisches Nanoplankton angegeben. Wollast (1974) schließt eine Bedeutung von Auftrieb für die Lösung von Opal in der Wassersäule mit dem Argument aus, daß nach seinen Berechnungen, denen eine maximale Auftriebsrate von 50 m/Jahr zugrunde liegt, nur Partikel mit einem Durchmesser $<1 \mu\text{m}$ maßgeblich beeinflusst würden. In Anbetracht der geringen Größe des partikulären Opals im Weddellwirbel und der Tatsache, daß lokal deutlich höhere Auftriebsraten in Frage kommen, muß die Möglichkeit, daß Auftrieb die Partikelerhaltung beeinflusst, neu diskutiert werden.

5.2.4 Zirkulationsmodelle

Daß ein Stoff durch isopyknische Mischung, diapyknische Mischung oder durch Advektion an den Ort gelangt sein kann, an dem er gemessen wird, führt dazu, daß

jeweils eine dieser Größen nur unter Kenntnis der beiden anderen bestimmt werden kann. In der Literatur sind Beispiele zu finden, in denen eine dieser Größen unter Vernachlässigung der beiden anderen bestimmt wurde (horizontale Mischungskoeffizienten über ^{228}Ra : z.B. Sarmiento et al. 1982, vertikale Mischungskoeffizienten über ^{227}Ac : z.B. Nozaki 1993), wobei der mögliche Einfluß einer Vernachlässigung jeweils berücksichtigt wurde. Sollen alle drei Größen simultan bestimmt werden, braucht man mehrere Tracer, davon mindestens einen mit Zeitinformation (Ku und Luo 1994). Diese Information kann über eine Eintragsfunktion gegeben sein, wie z.B. bei den anthropogenen halogenierten Kohlenwasserstoffen, über eine Zerfallskonstante (bei radioaktiven Tracern) oder über eine Kombination der beiden (z.B. Tritium, Süßenfuß 1998). Bei Experimenten (Ledwell et al. 2000) kann auch die Zugabe eines Tracers in ein natürliches System als Startwert genutzt werden. Für die horizontale Advektion stehen Zeitinformationen weiterhin aus Satellitenmessungen oder von Strömungsmessern zur Verfügung (z.B. Gouretski und Danilov 1994; Schröder und Fahrbach 1999). Generell sind für geringe Tiefen aus verschiedenen Gründen mehr Informationen verfügbar als für die Tiefsee:

- Anthropogene Tracer sind in größeren Tiefen oft noch nicht nachzuweisen
- Die Prozesse in der Tiefe sind so langsam oder so großräumig, daß manche Verfahren schwer anwendbar sind (z.B. Strömungsmesser, Driftkörper)
- Satellitenmessungen bilden hauptsächlich den Oberflächenzustand ab

Zwar stellen die natürlichen Zerfallsreihen (Abbildung 2) einige Tracer zur Verfügung, doch sind diese für Tiefseefragestellungen oft nur bedingt nutzbar, teils wegen ihrer Partikelreaktivität und dem daraus resultierenden nichtkonservativen Verhalten, teils schränkt die Halbwertszeit die Anwendung auf Meeresbodennähe ein (Radonisotope, z.B. Broecker und Peng 1982), teils ist die Quelle nicht tiefseespezifisch (^{228}Ra , Moore 1969) oder der Tracer hat zwar seine Hauptquelle in der Tiefsee, weist jedoch eine sehr lange Halbwertszeit für die Fragestellung auf (^{226}Ra , z.B. Ku und Luo 1994). Zusätzliche Tracer sind also wünschenswert, will man die jeweiligen Anteile von isopyknischer Mischung, diapiknischer Mischung und Advektion für die Tiefsee besser quantifizieren.

Nozaki (1983b) schlug ^{227}Ac als tiefenwasserspezifischen, konservativen Tracer mit adäquater Halbwertszeit zur Untersuchung von Transportprozessen im Ozean vor: „*Conjunction of the two different K values [Mischungskoeffizienten] for the deep and bottom waters may be tested if an additional radioactive tracer with an appropriate half-*

life is available. The best candidate is ^{227}Ac with a half-life of 22 years which seems to be supplied from sediments to the overlying water much like Ra isotopes...". Die genaue Kenntnis von Mischungskoeffizienten ist für die Qualität globaler Zirkulationsmodelle von entscheidender Bedeutung.

Modelle der globalen Zirkulation des Ozeans sind ein wichtiges Mittel, das Verständnis mariner Prozesse darzustellen und zu verbessern. Die Qualität solcher Modelle ist eng mit der Qualität der zugrundeliegenden Daten verknüpft. Zur Modellierung von Transportprozessen im Ozean müssen Zahlen für isopyknische Mischung und diapiknische Mischung bekannt sein. Nur so kann der Anteil von Advektion genau bestimmt werden und zuverlässige Ergebnisse zu Stoff- und Energietransporten oder biologischer Produktion können berechnet werden. ^{227}Ac kann mit seiner zusätzlichen Zeitinformation ein Mittel sein, isopyknische Mischung, diapiknische Mischung und Advektion simultan zu bestimmen. Mit dem Vorliegen weiterer $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ -Daten für das Südpolarmeer könnte das Modell von Ku und Luo (1994) für ^{226}Ra auf $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ übertragen werden und dort eine gleichzeitige Bestimmung von isopyknischer Mischung, diapiknischer Mischung und Advektion ermöglichen.

6 Fazit

Über die Verteilung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ im Ozean war vor dem Vorliegen dieser Arbeit sehr wenig bekannt. Es existierten nur drei Messungen von gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule des Nordpazifik sowie einige indirekte Aussagen über sein Tochternuklid ^{227}Th . Die Datenbasis konnte mit dieser Arbeit beträchtlich erweitert werden. Es wurde neun neue Tiefenprofile aus anderen Regionen (Arktis, Südostpazifik, ACC und Weddellwirbel) hinzugefügt, und erstmals wurde das Verhältnis zwischen partikulär gebundenem und gelöstem ^{227}Ac in der Wassersäule bestimmt. Auf Grundlage bereits vorliegender und neuer Profile konnte ein erster Schätzwert von 12,6 kg für die Gesamtmenge von im Ozean befindlichem ^{227}Ac bestimmt werden.

Anhand eines Modells zur Freisetzung von ^{227}Ac aus Meeressedimenten wurde gezeigt, daß die Freisetzung von ^{227}Ac hauptsächlich in der Tiefsee geschieht. Ein Vergleich mit ^{228}Ra hat ergeben, daß laterale Einträge von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ an einem ^{228}Ra -Signal zu erkennen sein müssen. Die aus dem Modell erhaltenen Werte sind allerdings noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Insbesondere eine genauere Kenntnis der Bioturbationsraten wäre für eine genauere Abschätzung erforderlich, da die Flußraten sensibel auf diesen Wert reagieren.

Wesentliche Voraussetzung für den Einsatz von ^{227}Ac als Tracer war ein geeignetes Meßverfahren. Für das hier vorgestellte Verfahren konnte gezeigt werden, daß damit Actiniumkonzentrationen quantitativ bestimmt werden können.

Während im Südostpazifik die Befunde von Nozaki (1984) zur Verteilung von ^{227}Ac bestätigt werden konnten, bot sich im ACC und dem Weddellwirbel ein neues Bild. Hier konnte als Folge des Auftriebs von Tiefenwasser erstmals $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ durchgehend bis zur Meeresoberfläche nachgewiesen werden. Im Vergleich mit Nährstoffdaten im ACC konnte ein Zusammenhang zwischen dem Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser und der Verteilung von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ gezeigt werden.

Die besondere Kombination von Eigenschaften von ^{227}Ac , eine Halbwertszeit von 21,77 Jahren, geringe Partikelreaktivität und eine dominante Quelle am Tiefseeboden machen diesen Tracer für eine Reihe aktueller Fragestellungen zu einem interessanten Instrument.

Mit $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ können diapkyknische Mischungskoeffizienten bestimmt werden, die eine entscheidende Rolle im Verständnis des Energie- und Stoffhaushalts im Ozean spielen. $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ kann im ACC zur Identifikation von Einträgen nährstoffreichen

Tiefenwassers herangezogen werden. Auch Einträge von Eisen, dem eine wichtige Rolle bei der Steuerung der biologischen Produktion im Südpolarmeer zugeschrieben wird, könnten mit Hilfe von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ in Zukunft besser einer Quelle zugeordnet werden.

Am Beispiel des Weddellwirbels wurde gezeigt, daß $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ grundsätzlich ein geeigneter Tracer zur Bestimmung von Auftriebsgeschwindigkeiten ist. Dort wurden Mindestgeschwindigkeiten für den tiefen Auftrieb von 55 m/Jahr berechnet. Ein einfaches Modell zum Einfluß von Auftrieb auf die Erhaltung von Partikeln in der Wassersäule ergab, daß Auftrieb eine Rolle bei der geringen Erhaltung des Produktionssignals im Weddellwirbel spielen kann.

In Zukunft können mit Hilfe von $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ die jeweiligen Anteile von diapyknischer Mischung, isopyknischer Mischung und Advektion in globalen Zirkulationsmodellen genauer abgeschätzt werden. Insgesamt erweist sich $^{227}\text{Ac}_{\text{ex}}$ als hervorragend geeigneter Tracer zur Untersuchung von Mischung und Advektion von Wassermassen, die in Kontakt mit dem Tiefseeboden gestanden haben.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Prof. Fütterer für die Betreuung der Arbeit bedanken. Er hat entscheidende Verbesserungen an der Struktur der Arbeit bewirkt. Durch seine Art der Leitung der Sektion Meeresgeologie und seine Offenheit für neue Ideen war die Durchführung dieses und weiterer Forschungsvorhaben erst möglich. Prof. Schlüter möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und für wesentliche Ergänzungen danken, die diese Arbeit durch seine Anmerkungen erhalten hat.

Dr. Michiel M. Rutgers van der Loeff hat mich in dieser Zeit mit vielen fruchtbaren Diskussionen, Offenheit für neue Ideen und fachkundigen Kommentaren in hervorragender Weise unterstützt. Er hat eine Atmosphäre von Kooperation in der Arbeitsgruppe geschaffen, die Forschung zu einer spannenden und angenehmen Tätigkeit macht.

Einen großen Anteil zum Gelingen dieses Werks hat Dr. Regina Usbeck mit einer steten Auffrischung und Ergänzung meiner naturwissenschaftlichen Grundkenntnisse, vielen weiterführenden Diskussionen, Korrekturen von anscheinend nicht immer schönen Vorabversionen, Motivation zur rechten Zeit und einer Menge Freispielen am Flipper beigetragen. Viele der hier vorgestellten Ideen sind in Zusammenarbeit mit ihr entstanden. Dipl.-Geol. Claudia Hanfland hat mit fachkundigen Korrekturen, einer angenehmen Zusammenarbeit und geduldigem Ertragen des Zustands meines Schreibtischs viel zu dieser Arbeit beigetragen. Sie hat in den letzten Monaten einen großen Anteil der laufenden Arbeiten übernommen und mir so den Freiraum gegeben, mich voll auf die Dissertation zu konzentrieren. Ich hoffe, mich bald revanchieren zu können. Dipl.-Chem. Ralph Engbrodt war mir in dieser Zeit mit Motivation, Kritik und Korrekturen zur rechten Zeit eine große Stütze. Alle drei zusammen schaffen eine Atmosphäre von gegenseitiger Unterstützung und Heiterkeit, die die Arbeit erst schön macht.

Steffen Niemann, Andreas Ratje und Ingrid Vöge haben viel zum Gelingen der Laborarbeit beigetragen. Dr. Marie-France Weirig hat mit mathematischen Geschick bei der Lösung eines zentralen Problems geholfen. Durch Dr. Volker Strass hat der ozeanographische Teil der Arbeit an Qualität gewonnen. Dr. Hans-Jürgen Walter hat mir einen hervorragenden Einstieg in die Arbeit mit natürlichen Radionukliden und in die Kunst des Schifffahrens gegeben. Besonders bedanken möchte ich mich bei der Besetzung der Polarstern, die mit großer Kompetenz, Hilfsbereitschaft und

Freundlichkeit die Gewinnung der Proben ermöglicht und Expeditionen zu Reisen macht, auf die ich mich freue.

Großen Dank schulde ich meinem Vater Erich Geibert, der wohl den größten Teil zu meiner Ausbildung beigetragen hat. Eva Geibert hat, indem sie mir zur rechten Zeit die Adresse des Alfred-Wegener-Instituts zugesteckt hat, ebenfalls einen entscheidenden Anteil beim Entstehen dieser Arbeit geleistet. Ulla Geibert hat mit stetem Wohlwollen und einer Ermahnung zur rechten Zeit den Fortgang der Arbeit begünstigt.

Mein lieber Freund Ralf Ibald hat mich in dieser Zeit stets wohlthuend daran erinnert, daß die Naturwissenschaft nur eines von vielen Modellen ist, sich die Welt zu erschließen.

Schließlich möchte ich mich bei Michaela Murken bedanken. Sie hat das Jahr 2000 für mich zum Beginn einer neuen Zeitrechnung gemacht. Sie hat mich mit viel Liebe, Geduld und dem Erwecken schlummernder Interessen bei der Arbeit unterstützt. Ich freue mich auf die Zeit mit ihr, wenn diese Arbeit nicht mehr unser ständiger Begleiter ist.

Viele Personen, die mir bei dieser Arbeit ebenfalls geholfen haben, sind ungenannt geblieben. Auch ihnen sei an dieser Stelle Dank gesagt. Ich freue mich, daß mich eine so erstaunlich große Anzahl Menschen unterstützt.

Danke!

7 Literatur

- ABELMANN, A., und R. GERSONDE: Biosiliceous particle flux in the Southern Ocean, *Marine Chemistry*, 35, 503-536, 1991.
- ALHASSANIEH, O., A. ABDUL-HADI, M. GHAFAR, und A. ABA: Separation of Th, U, Pa, Ra and Ac from natural environmental samples, *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 493-498, 1999.
- ALLELUJA, I.B., S.H.EBERLE, C.KELLER, H.W.KIRBY, H.MÜNZEL und A.SEIDEL: Ac Actinium. 8. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, in: Gmelin handbook of inorganic chemistry 40 Suppl. Vol. 1, 1981.
- ANDERSON, R.F.: The marine geochemistry of Thorium and Protactinium, *WHOI-81-1*, Massachusetts Institute of Technology und Woods Hole Oceanographic Institution, 287, 1981.
- ANDERSON, R.F., und A.P. FLEER: Determination of Natural Actinides and Plutonium in Marine Particulate Material, *Analytical Chemistry*, 54, 1142-1147, 1982.
- BACON, M.P., und M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF: Removal of thorium-234 by scavenging in the bottom nepheloid layer of the ocean, *Earth and Planetary Science Letters*, 92, 157-164, 1989.
- BELKIN, I.M., und A.L. GORDON: Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania, *Journal of Geophysical Research*, 101 (C2), 3675-3696, 1996.
- VAN BENNEKOM, A.J., G.W. BERGER, S.J. VAN DER GAAST, und R.T.P. DE VRIES: Primary productivity and the silica cycle in the Southern Ocean (Atlantic sector), *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 67, 19-30, 1988.
- BIDLE, K.D., und F. AZAM: Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages, *Nature*, 397, 508-511, 1999.
- BONN, W.J.: Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor, *Berichte zur Polarforschung* 180, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut, 186, 1995.
- BOUDREAU, B.P.: Diagenetic models and their implementation, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Santa Clara, Singapore, 1997.

BROECKER, W.S., und PENG, T.-H.: *Tracers in the sea*, New York, Lamont-Doherty Geological Observatory, 690, 1982.

BRULAND, K.W., und M.W. SILVER: Sinking rates of fecal pellets from gelatinous zooplankton (salps, pteropods, doliolids), *Marine Biology*, 63, 295-300, 1981.

CADÉE, G.C., H. GONZALEZ, und S.B. SCHNACK-SCHIEL: Krill diet affects faecal string settling, *Polar Biology*, 12, 75-80, 1992.

CHEN, J.H., R.L. EDWARDS und G.J. WASSERBURG: Mass spectrometry and applications to uranium-series disequilibrium, in: *Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine and environmental sciences*, herausgegeben von M. Ivanovich und R.S. Harmon, S. 174-206, Clarendon Press, Oxford, 1992.

COCHRAN, J.K., und S. KRISHNASWAMI: Radium, Thorium, Uranium, and ^{210}Pb in deep-sea sediments and sediment pore waters from the North Equatorial Pacific, *American Journal of Science*, 280, 849-889, 1980.

COTTON, S.: Lanthanides and actinides, *MacMillan Physical Science Series*, Houndsmills, Basingstoke, Hampshire, London, MacMillan Education Ltd, 1991.

DEACON, G.E.R.: The Weddell gyre, *Deep-Sea Research*, 26A, 981-995, 1979.

DEMASTER, D.J.: The supply and accumulation of silica in the marine environment, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 1715-1732, 1981.

EGBERT, G.D. und R.D. RAY: Significant dissipation of tidal energy in the deep ocean inferred from satellite altimeter data, *Nature*, 405, 775-778, 2000.

ENSDF : siehe NATIONAL NUCLEAR DATA CENTER

FAHRBACH, E.: Zirkulation und Wassermassenbildung im Weddellmeer, *Die Geowissenschaften*, 7, 246-253, 1993.

FAHRBACH, E., G. ROHARDT, M. SCHRÖDER und V. STRASS: Transport and structure of the Weddell Gyre, *Annales Geophysicae*, 12, 840-855, 1994.

FISCHER, G., D. FÜTTERER, R. GERSONDE, S. HONJO, D. OSTERMANN und G. WEFER: Seasonal variability of particle flux in the Weddell Sea and its relation to ice cover, *Nature*, 335, 426-428, 1988.

FRANCOIS, R., M.A. ALTABET, D.M. SIGMAN, M.P. BACON, M. FRANK, G. BOHRMANN, G. BAREILLE und L.D. LABEYRIE: Contribution of Southern Ocean surface-water stratification to low atmospheric CO₂ concentrations during the last glacial period, *Nature*, 389, 929-935, 1997.

FÜTTERER, D.K., H. GROBE und S. GRÜNIG: Quaternary sediment patterns in the Weddell Sea: relations and environmental conditions, *Paleoceanography*, 3 (5), 551-561, 1988.

GERSONDE, R.: The expedition Antarktis X/5 of RV "Polarstern" in 1992, *Berichte zur Polarforschung*, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut, 1993.

GIERLOFF-EMDEN, H.G.: Geographie des Meeres, Teil 1, Ozeane und Küsten, *Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Bd. 5*, Berlin, New York, Walter de Gruyter, 1980

GONZALEZ, H.E.: The distribution and abundance of krill faecal material and oval pellets in the Scotia and Weddell Seas (Antarctica) and their role in particle flux, *Polar Biology*, 12, 81-91, 1992

GORDON, A.L., D.T.GEORGI und H.W.TAYLOR: Antarctic Polar Front zone in the western Scotia sea-summer 1975, *Journal of Physical Oceanography*, 7, 309-328, 1977.

GORDON, A.L., C.T.A. CHEN, und W.G. METCALF: Winter mixed layer entrainment of Weddell Deep Water, *Journal of Geophysical Research*, 89 (C1), 637-640, 1984.

GORDON, A.L. und B.A. HUBER: Southern Ocean winter mixed layer, *Journal of Geophysical Research*, 95 (C7), 11655-11672, 1990.

GOURETSKI, V.V. und A.I. DANILOV: Weddell Gyre: structure of the eastern boundary, *Deep-Sea Research I*, 40 (3), 561-582, 1993.

GOURETSKI, V.V. und A.I. DANILOV: Characteristics of warm rings in the African sector of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Research I*, 41 (8), 1131-1157, 1994.

GSCHNEIDER JR., K.A.: Systematics in lanthanide and actinide solids, *Journal of Alloys and Compounds*, 223, 165-169, 1995.

HANSEN, R. G. und E. J. RING: The preparation and certification of a uranium reference material. Randburg, Council of Mineral Technology, Report M84, 8 S., 1983.

- HENDERSON, G.M., C. HEINZE, R.F. ANDERSON und A.M.E. WINGUTH: Global distribution of the ^{230}Th flux to ocean sediments constrained by GCM modelling, *Deep-Sea Research I*, 46, 1861-1893, 1999.
- HOPPEMA, M., E. FAHRBACH, M. SCHRÖDER, A. WISOTZKI und H.J.W. DE BAAR: Winter-summer differences of carbon dioxide and oxygen in the Weddell Sea surface layer, *Marine Chemistry*, 51, 177-192, 1995.
- HOPPEMA, M., E. FAHRBACH, M.H.C. STOLL und H.J.W. DE BAAR: Annual uptake of atmospheric CO_2 by the Weddell Sea derived from a surface layer balance, including estimations of entrainment and new production, *Journal of Marine Systems*, 19, 219-233, 1999.
- HOPPEMA, M., E. FAHRBACH und H.J.W. DE BAAR: Surface layer balance of the southern Antarctic Circumpolar Current (prime Meridian) used to derive carbon and silicate consumptions and annual air-sea exchange for CO_2 and oxygen, *Journal of Geophysical Research*, 105 (C5), 11359-11371, 2000.
- HUH, C.-A., D.L. ZAHNLE, L.F. SMALL und V.E. NOSHKIN: Budgets and behaviors of uranium and thorium series isotopes in Santa Monica Basin sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, 1743-1754, 1987.
- IVANOVICH, M. und HARMON, R.S. (Hrsg.): *Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine and environmental sciences*, Clarendon Press, Oxford, 1992.
- KEY, R. M., R. F. STALLARD, W. S. MOORE und J. L. SARMIENTO: Distribution and flux of ^{226}Ra and ^{228}Ra in the Amazon River estuary, *Journal of Geophysical Research*, 90 (C4), 6995-7004, 1985.
- KOCZY, F.F.: Natural Radium as a tracer in the ocean, in: *Proceedings of the second UN international conference on the peaceful uses of atomic energy*, 18, 351-357, 1958.
- KOZLOVA, O.G.: Diatoms of the Indian and Pacific Sectors of the Antarctic, Jerusalem, Israel program for scientific translations, 184 S., 1966.
- KU, T.-L. und S. LUO: New appraisal of Radium 226 as a large-scale oceanic mixing tracer, *Journal of Geophysical Research*, 99 (C5), 10255-10273, 1994.
- KU, T.-L. S. LUO, M. KUSAKABE und J. K. B. BISHOP: ^{228}Ra -derived nutrient budgets in the upper equatorial Pacific and the role of "new" silicate in limiting productivity, *Deep-Sea Research II*, 42 (2-3), 479-497, 1995.

- KUMAR, N., R.F. ANDERSON, P.N. FROELICH, P. KUBIK, B. DITTRICH-HANNEN und M. SUTER: Increased biological productivity and export production in the glacial Southern Ocean, *Nature*, 378, 675-680, 1995.
- LAO, Y., R.F. ANDERSON, W.S. BROECKER, S.E. TRUMBORE, H.J. HOFMANN und W. WOLFLI: Transport and burial rates of ^{10}Be and ^{231}Pa in the Pacific Ocean during the Holocene period, *Earth and Planetary Science Letters*, 113, 173-189, 1992.
- LEDWELL, J.R., E.T. MONTGOMERY, K.L. POLZIN, L.C. ST. LAURENT, R.W. SCHMITT und J.M. TOOLE: Evidence for enhanced mixing over rough topography in the abyssal ocean, *Nature*, 403, 179-182, 2000.
- LEFÈVRE, N., und A.J. WATSON: Modeling the geochemical cycle of iron in the oceans and its impact on atmospheric CO_2 concentrations, *Global Biogeochemical Cycles*, 13 (3), 727-736, 1999.
- LEYNAERT, A., D.M. NELSON, B. QUÉGUINER, und P. TRÉGUER: The silica cycle in the Antarctic Ocean: is the Weddell Sea atypical?, *Marine Ecology Progress Series*, 96, 1-15, 1993.
- LI, Y.-H., H.W. FEELY und J.R. TOGGWEILER: ^{228}Ra and ^{228}Th concentrations in GEOSECS Atlantic surface waters, *Deep-Sea Research*, 27A, 545-555, 1980.
- LISITZIN, A.P.: The silica cycle during the last ice age, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 50, 241-270, 1985.
- LÖSCHER, B.M., H.J.W. DE BAAR, J.T.M. DE JONG, C. VETH und F. DEHAIRS: The distribution of Fe in the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Research II*, 44 (1-2), 143-187, 1997.
- MANGINI, A. und C. SONNTAG: ^{231}Pa dating of deep-sea cores via ^{227}Th counting, *Earth and Planetary Science Letters*, 37, 251-256, 1977.
- MARTIN, J.H., M.R. GORDON und S.E. FITZWATER: Iron in Antarctic waters, *Nature*, 345, 156-158, 1990.
- MARTIN, P., G.J. HANCOCK, S. PAULKA, und R.A. AKBER: Determination of ^{227}Ac by α -particle spectrometry, *Applied Radiation and Isotopes*, 46 (10), 1065-1070, 1995.
- MARTINSON, D.G.: Open ocean convection in the Southern Ocean, in *Deep convection and deep water formation in the oceans*, herausgegeben von P.C. Chu, und J. C. Gascard, S. 37-52, Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1991.

- MIDDELBURG, J.J., K. SOETAERT, und P.M.J. HERMAN: Empirical relationships for use in global diagenetic models, *Deep-Sea Research I*, **44** (2), 327-344, 1997.
- MOORE, W.S.: Oceanic Concentrations of ^{228}Ra , *Earth and Planetary Science Letters*, **6**, 437-446, 1969.
- MOORE, W.S. und D.F. REID: Extraction of radium from natural waters using manganese-impregnated acrylic fibers, *Journal of Geophysical Research*, **78** (36), 8880-8886, 1973.
- MOORE, W.S.: Sampling ^{228}Ra in the deep ocean, *Deep-Sea Research*, **23**, 647-651, 1976.
- MOORE, W.S. und P.H. SANTSCHI: Ra-228 in the deep Indian Ocean, *Deep-Sea Research*, **33** (1), 107-120, 1986a.
- MOORE, W.S., J.L. SARMIENTO und R.M. KEY: Tracing the Amazon component of surface Atlantic water using ^{228}Ra , salinity and silica, *Journal of Geophysical Research*, **91** (C2), 2574-2580, 1986b.
- MOORE, W.S.: Radionuclides of the uranium and thorium decay series in the estuarine environment, in *Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine and environmental sciences*, herausgegeben von M. Ivanovich, und R. S. Harmon, S. 396-422, Clarendon Press, Oxford, 1992.
- MOORE, W.S. und R. ARNOLD: Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using a delayed coincidence counter, *Journal of Geophysical Research*, **101** (C1), 1321-1329, 1996.
- MUENCH, R.D.: Relict convective features in the Weddell Sea, in *Deep convection and deep water formation in the oceans*, herausgegeben von P. C. Chu, und J. C. Gascard, S. 53-67, Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1991.
- NATHANSON, A.: Über die Bedeutung vertikaler Wasserbewegungen für die Produktion des Planktons im Meere, *Abhandlungen der mathematisch-physischen Klasse der königl. sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften XXIX/V*, Leipzig, Teubner, 352-441, 1906.
- NATIONAL NUCLEAR DATA CENTER (2000): *Evaluated Nuclear Structure and Decay Data*, <http://ie.lbl.gov/ensdf>
- NELSON, D.M. und J.N. GOERING: Near-surface silica dissolution in the upwelling region off northwest Africa, *Deep-Sea Research*, **24**, 65-73, 1977.

NOZAKI, Y.: Determination of thorium isotopes in seawater by moored MnO₂-fiber method, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **39**, 129-135, 1983a.

NOZAKI, Y., und Y. HORIBE: Alpha emitting thorium isotopes in northwest Pacific deep waters, *Earth and Planetary Science Letters*, **65**, 39-50, 1983b.

NOZAKI, Y.: Excess ²²⁷Ac in deep ocean water, *Nature*, **310**, 486-488, 1984.

NOZAKI, Y., und H.-S. YANG: Th and Pa isotopes of the western margin of the Pacific near Japan: evidence for release of ²²⁸Ra and ²²⁷Ac from slope sediments, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **43**, 217-227, 1987.

NOZAKI, Y., M. YAMADA und H. NIKAIDO: The marine geochemistry of Actinium-227: evidence for its migration through sediment pore water, *Geophysical Research Letters*, **17** (11), 1933-1936, 1990.

NOZAKI, Y.: Actinium-227: a steady state tracer for the deep-sea basin-wide circulation and mixing studies, in *Deep ocean circulation, physical and chemical aspects*, herausgegeben von T. Teramoto, S. 139-155, Elsevier, 1993.

NOZAKI, Y., M. YAMADA, T. NAKANISHI, Y. NAGAYA, NAKAMURA KIYOSHI, K. SHITASHIMA und H. TSUBOTA: The distribution of radionuclides and some trace metals in the water columns of the Japan and Bonin trenches, *Oceanologica Acta*, **21** (3), 469-484, 1998.

ORSI, A.H., W. D. NOWLIN JR. und T. WHITWORTH III: On the circulation and stratification of the Weddell Gyre, *Deep-Sea Research I*, **40** (1), 169-203, 1993.

ORSI, A.H., T. WHITWORTH III und W.D. NOWLIN JR.: On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep-Sea Research I*, **42** (5), 641-673, 1995.

ORSI, A.H., G.C. JOHNSON und J.L. BULLISTER: Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water, *Progress in Oceanography*, **43**, 55-109, 1999.

PARK, Y.-H. und L. GAMBÉRONI: Large scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry, *Journal of Geophysical Research*, **100** (C12), 24911-24929, 1995.

PARK, Y. H., E. CHARRIAUD und M. FIEUX: Thermohaline structure of the Antarctic Surface Water/ Winter Water in the Indian sector of the Southern Ocean, *Journal of Marine Systems*, **17**, 5-23, 1998.

PARK, Y.-H., E. CHARRIAUD und P. CRANEGUY: Fronts, transport and Weddell Gyre at 30°E between Africa and Antarctica, *Journal of Geophysical Research -Southern Ocean Special Section*, eingereicht.

PERISSINOTTO, R. und E.A. PAKHOMOV: Contribution of salps to carbon flux of marginal ice zone of the Lazarev Sea, Southern Ocean, *Marine Biology*, 131, 25-32, 1998.

PIETSCH, E. (Hauptredakteur): Actinium und Isotope (MsTh₂). 8. Auflage, *Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie* 40, Berlin, 1942.

PONDAVEN, P., O. RAGUENAU, P. TRÉGUER, A. HAUVESPRE, L. DEZILAU und J.-L. REYSS: Resolving the 'opal paradox' in the Southern Ocean, *Nature*, 405, 168-172, 2000.

REID, D.F., R.M. KEY und D.R. SCHINK: Radium, thorium and actinium extraction from seawater using an improved manganese-oxide-coated fiber, *Earth and Planetary Science Letters*, 43, 223-226, 1979.

RICKERT, D.: Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments, *Berichte zur Polarforschung* 351, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 211 S., 2000.

RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M., und G.W. BERGER: Scavenging of ²³⁰Th and ²³¹Pa near the Antarctic Polar Front in the South Atlantic, *Deep-Sea Research I*, 40 (2), 339-357, 1993.

RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M.: ²²⁸Ra and ²²⁸Th in the Weddell Sea, in *The Polar Oceans and their role in shaping the global environment*, S. 177-186, 1994.

RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M., R.M. KEY, J. SCHOLTEN, D. BAUCH und A. MICHEL: ²²⁸Ra as a tracer for shelf water in the Arctic Ocean, *Deep-Sea Research II*, 42 (6), 1533-1553, 1995.

RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M., J. FRIEDRICH und U.V. BATHMANN: Carbon export during the spring bloom at the Antarctic Polar Front, determined with the natural tracer ²³⁴Th, *Deep-Sea Research II*, 44 (1-2), 457-478, 1997.

RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M. und W.S. MOORE: Determination of natural radioactive tracers, in *Methods of Seawater Analysis*, herausgegeben von K. Grasshoff, K. Kremling, und M. Ehrhardt, S. 365-397, 1999.

SARMIENTO, J.L., C.G. H. ROTH, und W.S. BROECKER: Radium 228 as a tracer of basin wide processes in the abyssal ocean, *Journal of Geophysical Research*, 87 (C12), 9694-9698, 1982.

SCHLITZER, R.: Electronic atlas of WOCE hydrographic and tracer data now available, *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 81 (5), 45, 2000.

SCHLITZER, R.: Ocean Data View 4.0, <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV/>, 1999.

SCHLÜTER, M.: Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen und östlichen Weddellmeeres. Geochemische Analyse und Modellierung, *Berichte zur Polarforschung* 73, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 156, 1990.

SCHLÜTER, M., M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF, O. HOLBY und G. KUHN: Silica cycle in surface sediments of the South Atlantic, *Deep-Sea Research I*, 45, 1085-1109, 1998.

SCHOLTEN, J. C., M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF und A. MICHEL: Distribution of ^{230}Th and ^{231}Pa in the water column in relation to the ventilation of the deep Arctic basins, *Deep-Sea Research II*, 42 (6), 1519-1531, 1995.

SCHRÖDER, M. und E. FAHRBACH: On the structure and the transport of the eastern Weddell Gyre, *Deep-Sea Research II*, 46, 501-527, 1999.

SILVER, M.W., J.G. MITCHELL und D.L. RINGO: Siliceous nanoplankton. II. Newly discovered cysts and abundant choanoflagellates from the Weddell Sea, Antarctica, *Marine Biology*, 58, 211-217, 1980.

SMETACEK, V.: Bacteria and silica cycling, *Nature*, 397, 475-476, 1999.

SMITH, W.H.F. und D.T. SANDWELL: Seafloor topography version 4.0, http://web.ngdc.noaa.gov/mgg/image/global_topo_large.gif, 2000.

SWIFT, J., RHINES, P. und SCHLITZER, R.: Atlas of ocean sections 1.0. NASA, Physical Oceanography DAAC, NSF, AWI, University of Washington, Scripps institution of oceanography, CD-ROM, 1999.

SÜLTENFUß, J.: Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer, *Berichte zur Polarforschung* 256, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, 200 S., 1998.

TYNAN, C.T.: Ecological importance of the Southern Boundary of the Antarctic Circumpolar Current, *Nature*, 392, 708-710, 1998.

USBECK, R.: Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes, *Berichte zur Polarforschung* 332, Bremerhaven, Alfred-Wegener-Institut, 1999.

WALTER, H.J., M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF und H. HOELTZEN: Enhanced scavenging of ^{231}Pa relative to ^{230}Th in the South Atlantic south of the Polar Front: Implications for the use of the $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ ratio as a paleoproductivity proxy, *Earth and Planetary Science Letters*, 149, 85-100, 1997.

WALTER, H.J., M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF, H. HÖLTZEN und U. BATHMANN: Reduced scavenging of ^{230}Th in the Weddell Sea: implications for paleoceanographic reconstructions in the South Atlantic, *Deep-Sea Research I*, 47, 1369-1387, 2000.

WALTER, H.J., W. GEIBERT, M.M. RUTGERS VAN DER LOEFF, G. FISCHER und U. BATHMANN: Shallow vs. deep-water scavenging of ^{231}Pa and ^{230}Th in radionuclide enriched waters of the Atlantic sector of the Southern Ocean, *Deep-Sea Research I*, 26 S., im Druck.

WEFER, G., G. FISCHER, D.K. FÜTTERER, R. GERSONDE, S. HONJO und D. OSTERMANN: Particle sedimentation and productivity in antarctic waters of the Atlantic Ocean, in *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*, herausgegeben von U. Bleil, und J. Thiede, S. 363-379, Kluwer Academic Publisher, 1990.

WHITWORTH III, T., und W.D. NOWLIN JR.: Water masses and currents of the Southern Ocean at the Greenwich Meridian, *Journal of Geophysical Research*, 92 (C6), 6462-6476, 1987.

WOLLAST, R.: The silica problem, in: *The sea- ideas and observations on progress in the study of the sea*, herausgegeben von E. D. Goldberg, S. 359-392, Wiley, New York, London, Sydney, Toronto, 1974.

WUNSCH, C.: Moon, tides and climate, *Nature*, 450, 743-744, 2000.

YANG, H.-S., Y. NOZAKI, H. SAKAI und A. MASUDA: The distribution of ^{230}Th and ^{231}Pa in the deep-sea surface sediments of the Pacific Ocean, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50, 81-89, 1986.

YOKOYAMA, Y. und H.-V. NGUYEN: Direct and non-destructive dating of marine sediments, manganese nodules, and corals by high resolution gamma-ray spectrometry, in *Isotope marine chemistry*, herausgegeben von E. D. Goldberg und Y. Horibe, S. 259-289, Tokyo, 1980.

ZHANG, J. und Y. NOZAKI: Behavior of rare earth elements in seawater at the ocean margin: a study along the slopes of the Sagami and Nankai troughs near Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62, 1307-1317, 1998.

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

Eventuelle Ergänzungen der Abkürzungen, Symbole und Variablenbezeichnungen wie Massezahlen, Indizes für Zeit etc. sind im Text bei den betreffenden Gleichungen angegeben. Auf eine Darstellung gebräuchlicher Einheiten und Symbole wurde verzichtet.

A:	Aktivität
AABW:	Antarktisches Bodenwasser
AAIW:	Antarktisches Zwischenwasser
AASW:	Antarktisches Oberflächenwasser
Ac:	Actinium
Ac _{diss} :	gelöstes Actinium
Ac _{part} :	Partikulär gebundenes Actinium
ACC:	Antarktischer Zirkumpolarstrom
Ac _{ex} :	Anteil von Ac, der ein Gleichgewicht mit seinem Mutternuklid überschreitet
Bi:	Wismut
c:	Jährlich nach der Lösung erhaltener Anteil des Gesamtflusses
CDW:	Zirkumpolares Tiefenwasser
D:	diapyknischer Eddy-Mischungskoeffizient
D _B :	Partikelmischungskoeffizient
dpm:	Zerfälle pro Minute
D _M :	molekularer Mischungskoeffizient
E:	Effizienz
E _γ :	Energie eines γ-Quants
Err:	Fehler
F:	Anteil von beim Zerfall des Mutternuklids ins Porenwasser emittierten Atome
fg:	Femtogramm
HPGe:	<i>High purity</i> Germanium
Φ:	Porosität
J:	Fluß
K _d :	Verteilungskoeffizient
keV:	Kiloelektronenvolt
λ:	Zerfallskonstante
La:	Lanthan
LCDW:	Unteres Zirkumpolares Tiefenwasser

MeV:	Megaelektronenvolt
NADW:	Nordatlantisches Tiefenwasser
P :	Produktionsrate
Pa:	Protactinium
Pb:	Blei
Po:	Polonium
Ra:	Radium
Rn:	Radon
ρ_s :	Feuchtraumdichte
S :	Sedimentationsrate
SW:	siehe AASW
t :	Zeitpunkt
$t_{1/2}$:	Halbwertszeit
T :	Transportdauer
Th:	Thorium
Tl:	Thallium
U:	Uran
UCDW:	Oberes Zirkumpolares Tiefenwasser
v :	Sinkgeschwindigkeit (von Partikeln)
w :	Auftriebsgeschwindigkeit
WDW:	Warmes Tiefenwasser
WG:	Weddellwirbel
WSBW:	Weddellmeer-Bodenwasser
WSDW:	Weddellmeer-Tiefenwasser
x :	Tiefe im Sediment
z :	Wassertiefe
$z_{1/2}$:	Halbwertstiefe

Tabelle der Meßwerte

Probe	Tiefe	Lat	Lon	Datum ²²⁷ Ac		Volumen Proben- Zerf.korr.		Adsorptions- ²²⁷ Ac		²²⁷ Ac	²³¹ Pa	abs. Fehler		abs. Fehler		Fehler %
				[l]	nahme [dpm]	effizienz ¹	Eff.korr.	dpm/m ³	[dpm/m ³]	²³¹ Pa	²²⁷ Ac _{ex}	²²⁷ Ac _{ex}				
PSPS2600 7A	270	-63.2	34.6	750	6.5.94	0.26	0.81	0.32	0.42117	0.25673	0.014	0.16	0.0530465	32.2578		
PSPS2600 7B	270	-63.2	34.6	750	6.5.94	0.05										
PS2600 6A	2000	-63.2	34.6	1152	6.5.94	0.81	0.60	1.36	1.18215	0.39779	0.021	0.78	0.104266	13.2931		
PS2600 6B	2000	-63.2	34.6	1152	6.5.94	0.33										
PS2600 5A	3500	-63.2	34.6	1012	6.5.94	0.99	0.66	1.51	1.49085	0.43857	0.020	1.05	0.0755667	7.18121		
PS2600 5B	3500	-63.2	34.6	1012	6.5.94	0.34										
PS2600 4A	4885	-63.2	34.6	887	6.5.94	1.96	0.53	3.69	4.15925	0.55163	0.030	3.61	0.2950969	8.17982		
PS2600 4B	4885	-63.2	34.6	887	6.5.94	0.92										
PS2600 3A	4985	-63.2	34.6	1140	6.5.94	3.04	0.54	5.60	4.9082	0.61562	0.027	4.29	0.3198951	7.45228		
PS2600 3B	4985	-63.2	34.6	1140	6.5.94	1.39										
PS2600 2A	5060	-63.2	34.6	1042	6.5.94	2.91	0.69	4.21	4.03685	0.60717	0.021	3.43	0.1851321	5.39794		
PS2600 2B	5060	-63.2	34.6	1042	6.5.94	0.90										
PS2579 7A	300	-63	7.76	690	22.4.94	0.41	0.81	0.51	0.74513	0.28781	0.018	0.46	0.0480629	10.5095		
PS2579 7B	300	-63	7.76	690	22.4.94	0.08										
PS2579 6A	1900	-63	7.76	1042	22.4.94	0.62	0.61	1.01	0.97281	0.44238	0.022	0.53	0.0793996	14.9688		
PS2579 6B	1900	-63	7.76	1042	22.4.94	0.24										
PS2579 5A	3500	-63	7.76	984	22.4.94	1.02	0.66	1.55	1.57058	0.52484	0.024	1.05	0.1110757	10.6218		
PS2579 5B	3500	-63	7.76	984	22.4.94	0.35										
PS2579 4A	5110	-63	7.76	923	22.4.94	2.20	0.62	3.57	3.87201	0.50077	0.024	3.37	0.2307675	6.84519		
PS2579 4B	5110	-63	7.76	923	22.4.94	0.85										
PS2579 2A	5285	-63	7.76	985	22.4.94	2.79	0.62	4.50	4.56617	0.55834	0.037	4.01	0.3562021	8.88765		
PS2579 2B	5285	-63	7.76	985	22.4.94	1.06										
PS2337 6A	500	-56.6	-54.9	1189	20.9.92	0.30	0.69	0.43	0.36371	0.2422	0.015	0.12	0.0637745	52.4848		
PS2337 6B	500	-56.6	-54.9	1189	20.9.92	0.22										
PS2337 4A	1500	-56.6	-54.9	1167	20.9.92	0.37	0.69	0.54	0.45987	0.31645	0.020	0.14	0.0806155	56.2088		
PS2337 4B	1500	-56.6	-54.9	1167	20.9.92	0.31										
PS2337 2A	2500	-56.6	-54.9	976	20.9.92	0.91	0.75	1.21	1.23742	0.34752	0.025	0.89	0.0888235	9.98133		
PS2337 2B	2500	-56.6	-54.9	976	20.9.92	0.23										
PS2337 1A	3500	-56.6	-54.9	1197	20.9.92	1.25	0.72	1.73	1.44541	0.32317	0.020	1.12	0.0885051	7.88642		
PS2337 1B	3500	-56.6	-54.9	1197	20.9.92	0.34										

Fortsetzung der Tabelle

Probe	Tiefe	Lat	Lon	Volumen [l]	Datum ²²⁷ Ac Proben-Zerf.korr. nahme [dpm]		Adsorptions- ²²⁷ Ac effizienz ¹ Eff.korr.		²²⁷ Ac	²³¹ Pa	abs. Fehler		abs. Fehler		Fehler %
							dpm/m ³	[dpm/m ³]	²³¹ Pa	²²⁷ Ac _{ex}	²²⁷ Ac _{ex}				
PS2660 7A	310	-50.2	-89.2	748	26.3.95	0.11	0.85	0.13	0.16762	0.1004	0.007	0.07	0.0198429	29.5204	
PS2660 7B	310	-50.2	-89.2	748	26.3.95	0.02									
PS2660 6A	610	-50.2	-89.2	920	26.3.95	0.13	0.77	0.17	0.18016	0.1505	0.011	0.03	0.0200803	67.6944	
PS2660 6B	610	-50.2	-89.2	920	26.3.95	0.03									
PS2660 5A	1510	-50.2	-89.2	884	26.3.95	0.30	0.72	0.41	0.46205	0.43206	0.018	0.03	0.0424931	141.684	
PS2660 5B	1510	-50.2	-89.2	884	26.3.95	0.08									
PS2660 4A	3010	-50.2	-89.2	545	26.3.95	0.23	0.58	0.40	0.74082	0.46782	0.025	0.27	0.0804248	29.4598	
PS2660 4B	3010	-50.2	-89.2	545	26.3.95	0.10									
PS2660 3A	4510	-50.2	-89.2	952	26.3.95	2.33	0.63	3.72	3.90793	0.42804	0.020	3.48	0.2567292	7.3775	
PS2660 3B	4510	-50.2	-89.2	952	26.3.95	0.87									
PS2176-2 6A	50	87.8	109	883	25.8.91	0.14	<i>0.69</i>	0.21	0.23322	0.065	0.007	0.17	0.0670094	39.8352	
PS2176-2 6B	50	87.8	109	883	25.8.91	0.11									
PS2176-2 5A	320	87.8	109	1273	25.8.91	0.13	<i>0.69</i>	0.18	0.14424	0.158	0.016	-0.01	0.0383108	-278.47	
PS2176-2 5B	320	87.8	109	1273	25.8.91	0.06									
PS2176-2 4A	1220	87.8	109	1264	25.8.91	0.07	<i>0.69</i>	0.11	0.08315	0.168	0.017	-0.08	0.0291832	-34.395	
PS2176-2 4B	1220	87.8	109	1264	25.8.91	0.07									
PS2176-2 3A	2220	87.8	109	1013	25.8.91	0.11	0.59	0.19	0.18811	0.27	0.027	-0.08	0.0454209	-55.465	
PS2176-2 3B	2220	87.8	109	1013	25.8.91	0.05									
PS2176-2 2A	3220	87.8	109	1014	25.8.91	0.13	<i>0.69</i>	0.19	0.19117	0.36	0.036	-0.17	0.0509914	-30.202	
PS2176-2 2B	3220	87.8	109	1014	25.8.91	0.10									
PS2176-2 1A	4220	87.8	109	1511	25.8.91	0.30	<i>0.69</i>	0.43	0.28448	0.344	0.034	-0.06	0.0635596	-106.78	
PS2176-2 1B	4220	87.8	109	1511	25.8.91	0.13									

¹Kursiv dargestellte Werte sind aufgrund eines großen Fehlers bei der Bestimmung der Adsorptionseffizienz durch Einsetzen der mittleren Adsorptionseffizienz von 0,69 erhalten worden

Fortsetzung der Tabelle

Probe	Tiefe	Lat	Lon	Volumen [l]	Datum ²²⁷ Ac Proben-Zerf.korr. nahme [dpm]	Adsorptions- ²²⁷ Ac effizienz ¹	Eff.korr.	²²⁷ Ac dpm/m ³	²³¹ Pa [dpm/m ³]	abs. Fehler ²³¹ Pa	abs. Fehler ²²⁷ Ac _{ex}	Fehler %
PS53-190 130m A	130	-54	20	1790	24.4.99	0.30	0.69	0.43	0.23979	0.1195	0.050	55.3049
PS53-190 130m B	130	-54	20	1790	24.4.99	0.00					0.12	0.0665286
PS53-190 400m A	400	-54	20	1425	24.4.99	0.56	0.73	0.77	0.54289	0.16	0.050	14.9458
PS53-190 400m B	400	-54	20	1425	24.4.99	0.15					0.38	0.0572256
PS53-190 700m A	700	-54	20	1247	24.4.99	0.83	0.83	1.01	0.81005	0.205	0.050	11.2623
PS53-190 700m B	700	-54	20	1247	24.4.99	0.15					0.61	0.0681428
PS53-190 1000m A	1000	-54	20	1579	24.4.99	0.73	0.56	1.30	0.82524	0.25	0.050	13.8128
PS53-190 1000m B	1000	-54	20	1579	24.4.99	0.32					0.58	0.0794566
PS53-197 120m A	120	-52	20	1618	1.5.99	0.52	0.85	0.61	0.37535	0.118	0.050	21.0636
PS53-197 120m B	120	-52	20	1618	1.5.99	0.08					0.26	0.0542063
PS53-197 400m A	400	-52	20	1114	1.5.99	0.36	0.69	0.53	0.47428	0.16	0.050	29.8995
PS53-197 400m B	400	-52	20	1114	1.5.99	0.37					0.31	0.0939686
PS53-197 700m A	700	-52	20	1343	1.5.99	0.48	0.80	0.60	0.44741	0.205	0.050	24.9357
PS53-197 700m B	700	-52	20	1343	1.5.99	0.10					0.24	0.0604457
PS53-197 1000m A	1000	-52	20	1758	1.5.99	0.44	0.74	0.59	0.33659	0.25	0.050	63.9697
PS53-197 1000m B	1000	-52	20	1758	1.5.99	0.11					0.09	0.0553896
PS53-206 130m A	130	-47	20.1	1755	5.5.99	0.15	0.70	0.21	0.11868	0.063	0.050	109.466
PS53-206 130m B	130	-47	20.1	1755	5.5.99	0.04					0.06	0.0609553
PS53-206 400m A	400	-47	20.1	1552	5.5.99	0.27	0.75	0.36	0.22948	0.09	0.050	37.5267
PS53-206 400m B	400	-47	20.1	1552	5.5.99	0.07					0.14	0.0523408
PS53-206 700m A	700	-47	20.1	641	5.5.99	0.15	0.91	0.16	0.25285	0.12	0.050	40.4734
PS53-206 700m B	700	-47	20.1	641	5.5.99	0.01					0.13	0.0537677
PS53-206 1000m A	1000	-47	20.1	1798	5.5.99	0.29	0.45	0.64	0.35375	0.15	0.050	30.6252
PS53-206 1000m B	1000	-47	20.1	1798	5.5.99	0.16			0		0.20	0.0624004
PS53-207 120m A	140	-44	20	2784	7.5.99	0.07	0.69	0.10	0.03417	0.064	0.050	-168.82
PS53-207 120m B	140	-44	20	2784	7.5.99	0.08			0		-0.03	0.0503522
PS53-207 410m A	410	-44	20	2287	7.5.99	0.28	0.72	0.39	0.17032	0.091	0.050	64.4153
PS53-207 410m B	410	-44	20	2287	7.5.99	0.08					0.08	0.0510935
PS53-207 510m A	510	-44	20	1883	7.5.99	0.21	0.53	0.40	0.21231	0.101	0.050	52.6753
PS53-207 510m B	510	-44	20	1883	7.5.99	0.10					0.11	0.0586344
PS2600-7 part	270	-63.2	34.6	750	6.5.94	0.00		0.00	-0.00215	0.0361	0.004	-37.28
PS2600-6 part	2000	-63.2	34.6	1152	6.5.94	0.00		0.00	-0.00333	0.0132	0.002	-38.059
PS2600-5 part	3500	-63.2	34.6	1012	6.5.94	0.01		0.01	0.00627	0.0205	0.002	-222.81
PS2600-4 part	4885	-63.2	34.6	887	6.5.94	0.02		0.02	0.02311	0.0377	0.011	-178.55
PS2600-3 part	4985	-63.2	34.6	1140	6.5.94	0.07		0.07	0.06201	0.1234	0.005	-18.646
PS2600-2 part	5060	-63.2	34.6	1042	6.5.94	0.07		0.07	0.06721	0.1023	0.005	-37.313

¹Kursiv dargestellte Werte sind aufgrund eines großen Fehlers bei der Bestimmung der Adsorptionseffizienz durch Einsetzen der mittleren Adsorptionseffizienz von 0,69 erhalten worden

Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“ sind bisher erschienen:

- * **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- * **Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS „Meteor““
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüge
zusammengestellt von Norbert Klages
- * **Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungsschiffes „Meteor““ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern
- * **Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen
zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher
- * **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS 'John Biscoe', February 1982“
by G. Hempel and R. B. Heywood
- * **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen „Eiswarte“)“
zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- * **Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS „Polar-sirkel“ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei
zusammengestellt von R. Schneppenheim
- * **Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“
by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer
- * **Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“
by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass
- * **Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982
zusammengestellt von Dieter Adelung
- * **Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS 'John Biscoe', February 1982 (II)“
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS „Polarstern““
Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundschieppnetzfüge und Liste der Probennahme an Robben und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Volz
- * **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS „Polarbjörn“ 1982/83“ (Sommerkampagne zur Atka-Bucht und zu den Kraut-Bergen), zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS „Polarstern“ (Kapstadt, 20. Januar 1983 – Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS „Polarstern“ 1982/83“
herausgegeben von Gotthilf Hempel
- * **Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12. - 16. May 1983, edited by S. B. Schnack
- * **Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV 'Walther Herwig' and RV 'Meteor'“ – First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls
by Uwe Piatkowski and Norbert Klages
- * **Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein
- * **Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“
by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski
- * **Heft Nr. 17/1984** – Fahrtbericht (cruise report) der „Polarstern“-Reise ARKTIS I, 1983“
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede
- * **Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS „Polarstern“ 1983/84“, Bericht von den Fahrabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer
- * **Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS „Polarstern“ 1983/84“, Bericht vom Fahrabschnitt 4, Punta Arenas-Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Kohnen
- * **Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS „Polarstern“ 1984, mit Beiträgen des FS „Valdivia“ und des Forschungsflugzeuges „Falcon 20“ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel
- * **Heft Nr. 21/1985** – „Euphausiid larvae in plankton from the vicinity of the Antarctic Peninsula, February 1982“ by Sigrid Marschall and Elke Mizdalski
- * **Heft Nr. 22/1985** – „Maps of the geographical distribution of macrozooplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean“ by Uwe Piatkowski
- * **Heft Nr. 23/1985** – „Untersuchungen zur Funktionsmorphologie und Nahrungsaufnahme der Larven des Antarktischen Krills *Euphausia superba* Dana“ von Hans-Peter Marschall

- Heft Nr. 24/1985** – „Untersuchungen zum Periglazial auf der König-Georg-Insel Südshetlandinseln/ Antarktika. Deutsche physiogeographische Forschungen in der Antarktis. – Bericht über die Kampagne 1983/84“ von Dietrich Barsch, Wolf-Dieter Blümel, Wolfgang Flügel, Roland Mäusbacher, Gerhard Stäblein, Wolfgang Zick
- **Heft Nr. 25/1985** – „Die Expedition ANTARKTIS III mit FS ‚Polarstern‘ 1984/1985“ herausgegeben von Gotthilf Hempel.
 - **Heft Nr. 26/1985** – “The Southern Ocean”; A survey of oceanographic and marine meteorological research work by Hellmer et al.
 - **Heft Nr. 27/1986** – „Spätleistozäne Sedimentationsprozesse am antarktischen Kontinentalhang vor Kapp Norvegia, östliche Weddell-See“ von Hannes Grobe
 - Heft Nr. 28/1986** – „Die Expedition ARKTIS III mit ‚Polarstern‘ 1985 mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Rainer Gersonde
 - **Heft Nr. 29/1986** – „5 Jahre Schwerpunktprogramm ‚Antarktisforschung‘ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.“ Rückblick und Ausblick. Zusammenge stellt von Gotthilf Hempel, Sprecher des Schwerpunktprogramms
 - Heft Nr. 30/1986** – “The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station for 1981 and 1982” by Marianne Gube and Friedrich Obleitner
 - **Heft Nr. 31/1986** – „Zur Biologie der Jugendstadien der Notothenioidei (Pisces) an der Antarktischen Halbinsel“ von A. Kellermann
 - **Heft Nr. 32/1986** – „Die Expedition ANTARKTIS IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86“ mit Beiträgen der Fahrtteilnehmer, herausgegeben von Dieter Fütterer
 - Heft Nr. 33/1987** – „Die Expedition ANTARKTIS-IV mit FS ‚Polarstern‘ 1985/86 – Bericht zu den Fahrtabschnitten ANT-IV/3-4“ von Dieter Karl Fütterer
 - Heft Nr. 34/1987** – „Zoogeographische Untersuchungen und Gemeinschaftsanalysen an antarktischen Makroplankton“ von U. Piatkowski
 - Heft Nr. 35/1987** – „Zur Verbreitung des Meso- und Makrozooplanktons in Oberflächenwasser der Weddell See (Antarktis)“ von E. Boysen-Ennen
 - Heft Nr. 36/1987** – „Zur Nahrungs- und Bewegungsphysiologie von *Salpa thompsoni* und *Salpa fusiformis*“ von M. Reinke
 - Heft Nr. 37/1987** – “The Eastern Weddell Sea Drifting Buoy Data Set of the Winter Weddell Sea Project (WWSP)” 1986 by Heinrich Hoerber und Marianne Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 38/1987** – “The Meteorological Data of the Georg von Neumayer Station for 1983 and 1984” by M. Gube-Lehnhardt
 - Heft Nr. 39/1987** – „Die Winter-Expedition mit FS ‚Polarstern‘ in die Antarktis (ANT V/1-3)“ herausgegeben von Sigrid Schnack-Schiel
 - Heft Nr. 40/1987** – “Weather and Synoptic Situation during Winter Weddell Sea Project 1986 (ANT V/2) July 16 - September 10, 1986” by Werner Rabe
 - Heft Nr. 41/1988** – „Zur Verbreitung und Ökologie der Seegurken im Weddellmeer (Antarktis)“ von Julian Gutt
 - Heft Nr. 42/1988** – “The zooplankton community in the deep bathyal and abyssal zones of the eastern North Atlantic” by Werner Beckmann
 - **Heft Nr. 43/1988** – “Scientific cruise report of Arctic Expedition ARK IV/3” Wissenschaftlicher Fahrtbericht der Arktis-Expedition ARK IV/3, compiled by Jörn Thiede
 - **Heft Nr. 44/1988** – “Data Report for FV ‘Polarstern’ Cruise ARK IV/1, 1987 to the Arctic and Polar Fronts” by Hans-Jürgen Hirche
 - Heft Nr. 45/1988** – „Zoogeographie und Gemeinschaftsanalyse des Makrozoobenthos des Weddellmeeres (Antarktis)“ von Joachim Voß
 - Heft Nr. 46/1988** – “Meteorological and Oceanographic Data of the Winter-Weddell-Sea Project 1986 (ANT V/3)“ by Eberhard Fahrbach
 - Heft Nr. 47/1988** – „Verteilung und Herkunft glazial-mariner Gerölle am Antarktischen Kontinentalrand des östlichen Weddellmeeres“ von Wolfgang Oskierski
 - Heft Nr. 48/1988** – „Variationen des Erdmagnetfeldes an der GvN-Station“ von Arnold Brodscholl
 - **Heft Nr. 49/1988** – „Zur Bedeutung der Lipide im antarktischen Zooplankton“ von Wilhelm Hagen
 - **Heft Nr. 50/1988** – „Die gezeitenbedingte Dynamik des Ekström-Schelfeises, Antarktis“ von Wolfgang Kobarg
 - Heft Nr. 51/1988** – „Ökomorphologie nototheniider Fische aus dem Weddellmeer, Antarktis“ von Werner Ekau
 - Heft Nr. 52/1988** – „Zusammensetzung der Bodenfauna in der westlichen Fram-Straße“ von Dieter Piepenburg
 - **Heft Nr. 53/1988** – „Untersuchungen zur Ökologie des Phytoplanktons im südöstlichen Weddellmeer (Antarktis) im Jan./Febr. 1985“ von Eva-Maria Nöthig
 - Heft Nr. 54/1988** – „Die Fischfauna des östlichen und südlichen Weddellmeeres: geographische Verbreitung, Nahrung und trophische Stellung der Fischarten“ von Wiebke Schwarzbach
 - Heft Nr. 55/1988** – “Weight and length data of zooplankton in the Weddell Sea in austral spring 1986 (Ant. V/3)“ by Elke Mizdalski
 - Heft Nr. 56/1989** – “Scientific cruise report of Arctic expeditions ARK IV/1, 2 & 3” by G. Krause, J. Meinke und J. Thiede

- Heft Nr. 57/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS V mit FS ‚Polarstern‘ 1986/87“
Bericht von den Fahrtabschnitten ANT V/4-5 von H. Miller und H. Oerter
- * **Heft Nr. 58/1989** – „Die Expedition ANTARKTIS VI mit FS ‚Polarstern‘ 1987/88“
von D. K. Fütterer
 - Heft Nr. 59/1989** – „Die Expedition ARKTIS V/1a, 1b und 2 mit FS ‚Polarstern‘ 1988“
von M. Spindler
 - Heft Nr. 60/1989** – „Ein zweidimensionales Modell zur thermohalinen Zirkulation unter dem Schelfeis“
von H. H. Hellmer
 - Heft Nr. 61/1989** – „Die Vulkanite im westlichen und mittleren Neuschwabenland, Vestfjella und Ahlmannryggen, Antarktika“ von M. Peters
 - * **Heft Nr. 62/1989** – „The Expedition ANTARKTIS VII/1 and 2 (EPOS I) of RV ‚Polarstern‘ in 1988/89“, by I. Hempel
 - Heft Nr. 63/1989** – „Die Eisalgenflora des Weddellmeeres (Antarktis): Artenzusammensetzung und Biomasse sowie Ökophysiologie ausgewählter Arten“ von Annette Bartsch
 - Heft Nr. 64/1989** – „Meteorological Data of the G.-v.-Neumayer-Station (Antarctica)“ by L. Helmes
 - Heft Nr. 65/1989** – „Expedition Antarktis VII/3 in 1988/89“ by I. Hempel, P. H. Schalk, V. Smetacek
 - Heft Nr. 66/1989** – „Geomorphologisch-glaziologische Detailkartierung des arid-hochpolaren Borgmassivet, Neuschwabenland, Antarktika“ von Karsten Brunk
 - Heft Nr. 67/1990** – „Identification key and catalogue of larval Antarctic fishes“, edited by Adolf Kellermann
 - Heft Nr. 68/1990** – „The Expedition Antarktis VII/4 (Epos leg 3) and VII/5 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“, edited by W. Arntz, W. Ernst, I. Hempel
 - Heft Nr. 69/1990** – „Abhängigkeiten elastischer und rheologischer Eigenschaften des Meereises vom Eisgefüge“, von Harald Hellmann
 - * **Heft Nr. 70/1990** – „Die beschalten benthischen Mollusken (Gastropoda und Bivalvia) des Weddellmeeres, Antarktis“, von Stefan Hain
 - Heft Nr. 71/1990** – „Sedimentologie und Paläomagnetik an Sedimenten der Maudkuppe (Nordöstliches Weddellmeer)“, von Dieter Cordes
 - Heft Nr. 72/1990** – „Distribution and abundance of planktonic copepods (Crustacea) in the Weddell Sea in summer 1980/81“, by F. Kurbjewit and S. Ali-Khan
 - Heft Nr. 73/1990** – „Zur Frühdiagenese von organischem Kohlenstoff und Opal in Sedimenten des südlichen und östlichen Weddellmeeres“, von M. Schlüter
 - Heft Nr. 74/1990** – „Expeditionen ANTARKTIS-VIII/3 und VIII/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1989“
von Rainer Gersonde und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 75/1991** – „Quartäre Sedimentationsprozesse am Kontinentalhang des Süd-Orkey-Plateaus im nordwestlichen Weddellmeer (Antarktis)“, von Sigrun Grünig
 - Heft Nr. 76/1990** – „Ergebnisse der faunistischen Arbeiten im Benthal von King George Island (Südshetlandinseln, Antarktis)“, von Martin Rauschert
 - Heft Nr. 77/1991** – „Verteilung von Mikroplankton-Organismen nordwestlich der Antarktischen Halbinsel unter dem Einfluß sich ändernder Umweltbedingungen im Herbst“, von Heinz Klöser
 - Heft Nr. 78/1991** – „Hochauflösende Magnetostratigraphie spätquartärer Sedimente arktischer Meeresgebiete“, von Norbert R. Nowaczyk
 - Heft Nr. 79/1991** – „Ökophysiologische Untersuchungen zur Salinitäts- und Temperaturtoleranz antarktischer Grünalgen unter besonderer Berücksichtigung des β -Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP) - Stoffwechsels“, von Ulf Karsten
 - Heft Nr. 80/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Jörn Thiede und Gotthilf Hempel
 - Heft Nr. 81/1991** – „Paläoglazilogie und Paläozeanographie im Spätquartär am Kontinentalrand des südlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Martin Melles
 - Heft Nr. 82/1991** – „Quantifizierung von Meeresseigenschaften: Automatische Bildanalyse von Dünnschnitten und Parametrisierung von Chlorophyll- und Salzgehaltsverteilungen“, von Hajo Eicken
 - Heft Nr. 83/1991** – „Das Fließen von Schelfeisen - numerische Simulationen mit der Methode der finiten Differenzen“, von Jürgen Determann
 - Heft Nr. 84/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII/1-2, 1989 mit der Winter Weddell Gyre Study der Forschungsschiffe ‚Polarstern‘ und ‚Akademik Fedorov‘“, von Ernst Augstein, Nikolai Bagriantsev und Hans Werner Schenke
 - Heft Nr. 85/1991** – „Zur Entstehung von Unterwassereis und das Wachstum und die Energiebilanz des Meereises in der Alka Bucht, Antarktis“, von Josef Kipfstuhl
 - * **Heft Nr. 86/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-VIII/5“, von Heinz Miller und Hans Oerter
 - Heft Nr. 87/1991** – „Scientific cruise reports of Arctic expeditions ARK VI/1-4 of RV ‚Polarstern‘ in 1989“, edited by G. Krause, J. Meincke & H. J. Schwarz
 - Heft Nr. 88/1991** – „Zur Lebensgeschichte dominanter Copepodenarten (*Calanus finmarchicus*, *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*) in der Framstraße“, von Sabine Diehl

- Heft Nr. 89/1991** – „Detaillierte seismische Untersuchungen am östlichen Kontinentalrand des Weddell-Meeres vor Kapp Norvegia, Antarktis“, von Norbert E. Kaul
- Heft Nr. 90/1991** – „Die Expedition ANTARKTIS-VIII mit FS ‚Polarstern‘ 1989/90. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT-VIII/6-7“, herausgegeben von Dieter Karl Fütterer und Otto Schrems
- Heft Nr. 91/1991** – „Blood physiology and ecological consequences in Weddell Sea fishes (Antarctica)“, by Andreas Kunzmann
- Heft Nr. 92/1991** – „Zur sommerlichen Verteilung des Mesozooplanktons im Nansen-Becken, Nordpolarmeer“, von Nicolai Mumm
- Heft Nr. 93/1991** – „Die Expedition ARKTIS VII mit FS ‚Polarstern‘, 1990. Bericht vom Fahrtabschnitt ARK VII/2“, herausgegeben von Gunther Krause
- Heft Nr. 94/1991** – „Die Entwicklung des Phytoplanktons im östlichen Weddellmeer (Antarktis) beim Übergang vom Spätwinter zum Frühjahr“, von Renate Scharek
- Heft Nr. 95/1991** – „Radioisotopenstratigraphie, Sedimentologie und Geochemie jungquartärer Sedimente des östlichen Arktischen Ozeans“, von Horst Bohrmann
- Heft Nr. 96/1991** – „Holozäne Sedimentationsentwicklung im Scoresby Sund, Ost-Grönland“, von Peter Marienfeld
- Heft Nr. 97/1991** – „Strukturelle Entwicklung und Abkühlungsgeschichte von Heimefrontfjella (Westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Joachim Jacobs
- Heft Nr. 98/1991** – „Zur Besiedlungsgeschichte des antarktischen Schelfes am Beispiel der Isopoda (Crustacea, Malacostraca)“, von Angelika Brandt
- **Heft Nr. 99/1992** – „The Antarctic ice sheet and environmental change: a three-dimensional modelling study“, by Philippe Huybrechts
 - **Heft Nr. 100/1992** – „Die Expeditionen ANTARKTIS IX/1-4 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1990/91“ herausgegeben von Ulrich Bathmann, Meinhard Schulz-Baldes, Eberhard Fahrbach, Victor Smetacek und Hans-Wolfgang Hubberten
 - Heft Nr. 101/1992** – „Wechselbeziehungen zwischen Schwermetallkonzentrationen (Cd, Cu, Pb, Zn) im Meerwasser und in Zooplanktonorganismen (Copepoda) der Arktis und des Atlantiks“, von Christa Pohl
 - Heft Nr. 102/1992** – „Physiologie und Ultrastruktur der antarktischen Grünalge *Prasiola crista ssp. antarctica* unter osmotischem Stress und Austrocknung“, von Andreas Jacob
 - **Heft Nr. 103/1992** – „Zur Ökologie der Fische im Weddellmeer“, von Gerd Hubold
 - Heft Nr. 104/1992** – „Mehrkanaalige adaptive Filter für die Unterdrückung von multiplen Reflexionen in Verbindung mit der freien Oberfläche in marinen Seismogrammen“, von Andreas Rosenberger
 - Heft Nr. 105/1992** – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1991 (REFLEX I)“, von Jörg Hartmann, Christoph Kottmeier und Christian Wamser
 - Heft Nr. 106/1992** – „Ostracoden im Epipelagial vor der Antarktischen Halbinsel - ein Beitrag zur Systematik sowie zur Verbreitung und Populationsstruktur unter Berücksichtigung der Saisonalität“, von Rüdiger Kock
 - **Heft Nr. 107/1992** – „ARCTIC '91: Die Expedition ARK-VIII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, von Dieter K. Fütterer
 - Heft Nr. 108/1992** – „Dehnungsbeben an einer Störungszone im Ekström-Schelfeis nördlich der Georg-von-Neumayer-Station, Antarktis. – Eine Untersuchung mit seismologischen und geodätischen Methoden“, von Uwe Nixdorf
 - **Heft Nr. 109/1992** – „Spätquartäre Sedimentation am Kontinentalrand des südöstlichen Weddellmeeres, Antarktis“, von Michael Weber
 - **Heft Nr. 110/1992** – „Sedimentfazies und Bodenwasserstrom am Kontinentalhang des norwestlichen Weddellmeeres“, von Isa Brehme
 - Heft Nr. 111/1992** – „Die Lebensbedingungen in den Solekanälen des antarktischen Meereises“, von Jürgen Weissenberger
 - Heft Nr. 112/1992** – „Zur Taxonomie von rezenten benthischen Foraminiferen aus dem Nansen Becken, Arktischer Ozean“, von Jutta Wollenburg
 - Heft Nr. 113/1992** – „Die Expedition ARKTIS VIII/1 mit FS ‚Polarstern‘ 1991“, herausgegeben von Gerhard Kattner
 - **Heft Nr. 114/1992** – „Die Gründungsphase deutscher Polarforschung, 1865 - 1875“, von Reinhard A. Krause
 - Heft Nr. 115/1992** – „Scientific Cruise Report of the 1991 Arctic Expedition ARK VIII/2 of RV ‚Polarstern‘ (EPOS II)“, by Eike Racher
 - Heft Nr. 116/1992** – „The Meteorological Data of the Georg-von-Neumayer-Station (Antarctica) for 1988, 1989, 1990 and 1991“, by Gert König-Langlo
 - Heft Nr. 117/1992** – „Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der zentralen Heimefrontfjella (westliches Dronning Maud Land / Antarktis)“, von Peter Schulze
 - Heft Nr. 118/1993** – „Die mafischen Gänge der Shackleton Range / Antarktika: Petrographie, Geochemie, Isotopengeochemie und Paläomagnetik“, von Rüdiger Hotten
 - **Heft Nr. 119/1993** – „Gefrierschutz bei Fischen der Polarmeere“, von Andreas P. A. Wöhrmann
 - **Heft Nr. 120/1993** – „East Siberian Arctic Region Expedition '92: The Laptev Sea - its Significance for Arctic Sea-Ice Formation and Transpolar Sediment Flux“, by D. Dethleff, D. Nürnberg, E. Reimnitz, M. Saarso and Y. P. Sacchenko. – „Expedition to Novaja Zemlja and Franz Josef Land with RV ‚Dalnie Zelentsy‘“, by D. Nürnberg and E. Groth.

- Heft Nr. 121/1993 – „Die Expedition ANTARKTIS X/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Michael Spindler, Gerhard Diekmann und David Thomas
- Heft Nr. 122/1993 – „Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln“, von Michael Diepenbroek.
- Heft Nr. 123/1993 – „Zerstörungsfreie hochauflösende Dichteuntersuchungen mariner Sedimente“, von Sebastian Gerland.
- Heft Nr. 124/1993 – „Umsatz und Verteilung von Lipiden in arktischen marinen Organismen unter besonderer Berücksichtigung unterer trophischer Stufen“, von Martin Graeve.
- Heft Nr. 125/1993 – „Ökologie und Respiration ausgewählter arktischer Bodenfischarten“, von Christian F. von Dorrien.
- Heft Nr. 126/1993 – „Quantitative Bestimmung von Paläoumweltparametern des Antarktischen Oberflächenwassers im Spätquartier anhand von Transferfunktionen mit Diatomeen“, von Ulrich Zielinski
- Heft Nr. 127/1993 – „Sedimenttransport durch das arktische Meereis: Die rezente lithogene und biogene Materialfracht“, von Ingo Wollenburg.
- Heft Nr. 128/1993 – „Cruise ANTARKTIS X/3 of RV ‚Polarstern‘: CTD-Report“, von Marek Zwierz.
- Heft Nr. 129/1993 – „Reproduktion und Lebenszyklen dominanter Copepodenarten aus dem Weddellmeer, Antarktis“, von Frank Kurbjeweit
- Heft Nr. 130/1993 – „Untersuchungen zu Temperaturregime und Massenhaushalt des Filchner-Ronne-Schelfeises, Antarktis, unter besonderer Berücksichtigung von Anfrier- und Abschmelzprozessen“, von Klaus Grosfeld
- Heft Nr. 131/1993 – „Die Expedition ANTARKTIS X/5 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Rainer Gersonde
- Heft Nr. 132/1993 – „Bildung und Abgabe kurzketziger halogener Kohlenwasserstoffe durch Makroalgen der Polarregionen“, von Frank Laturnus
- Heft Nr. 133/1994 – „Radiation and Eddy Flux Experiment 1993 (REFLEX II)“, by Christoph Kottmeier, Jörg Hartmann, Christian Wamser, Axel Bocher, Christof Lüpkes, Dietmar Freese and Wolfgang Cohrs
- Heft Nr. 134/1994 – „The Expedition ARKTIS-IX/1“, edited by Hajo Eicken and Jens Meincke
- Heft Nr. 135/1994 – „Die Expeditionen ANTARKTIS X/6-8“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek, Hein de Baar, Eberhard Fahrback und Gunter Krause
- Heft Nr. 136/1994 – „Untersuchungen zur Ernährungsökologie von Kaiserpinguinen (*Aptenodytes forsteri*) und Königspinguinen (*Aptenodytes patagonicus*)“, von Klemens Pütz
- Heft Nr. 137/1994 – „Die kältezoische Vereisungsgeschichte der Antarktis“, von Werner U. Ehrmann
- Heft Nr. 138/1994 – „Untersuchungen stratosphärischer Aerosole vulkanischen Ursprungs und polarer stratosphärischer Wolken mit einem Mehrwellenlängen-Lidar auf Spitzbergen (79° N, 12° E)“, von Georg Beyerle
- Heft Nr. 139/1994 – „Charakterisierung der Isopodenfauna (Crustacea, Malacostraca) des Scotia-Bogens aus biogeographischer Sicht: Ein multivariater Ansatz“, von Holger Winkler.
- Heft Nr. 140/1994 – „Die Expedition ANTARKTIS X/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1992“, herausgegeben von Peter Lemke
- Heft Nr. 141/1994 – „Satellitenaltimetrie über Eis – Anwendung des GEOSAT-Altimeters über dem Ekströmsen, Antarktis“, von Clemens Heidland
- Heft Nr. 142/1994 – „The 1993 Northeast Water Expedition. Scientific cruise report of RV ‚Polarstern‘ Arctic cruises ARK IX/2 and 3, USCG ‚Polar Bear‘ cruise NEWP and the NEWLand expedition“, edited by Hans-Jürgen Hirche and Gerhard Kattner
- Heft Nr. 143/1994 – „Detaillierte refraktionsseismische Untersuchungen im inneren Scoresby Sund Ost-Grönland“, von Notker Fechner
- Heft Nr. 144/1994 – „Russian-German Cooperation in the Siberian Shelf Seas: Geo-System Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens, Hans-Wolfgang Hubberten, Sergey M. Pryamikov and Rüdiger Stein
- Heft Nr. 145/1994 – „The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report of RV ‚Polarstern‘ Arctic Cruises IX/2 and 3“, edited by Gerhard Kattner and Hans-Jürgen Hirche.
- Heft Nr. 146/1994 – „Radiation Measurements at the German Antarctic Station Neumayer 1982 - 1992“, by Torsten Schmidt and Gerd König-Langlo.
- Heft Nr. 147/1994 – „Krustenstrukturen und Verlauf des Kontinentalrandes im Weddell-Meer / Antarktis“, von Christian Hübscher.
- Heft Nr. 148/1994 – „The expeditions NORILSK/TAYMYR 1993 and BUNGER OASIS 1993/94 of the AWI Research Unit Potsdam“, edited by Martin Melles.
- ** Heft Nr. 149/1994 – „Die Expedition ARCTIC '93. Der Fahrabschnitt ARK-IX/4 mit FS ‚Polarstern‘ 1993“, herausgegeben von Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 150/1994 – „Der Energiebedarf der Pygoscelis-Pinguine: eine Synopse“, von Boris M. Culik.
- Heft Nr. 151/1994 – „Russian-German Cooperation: The Transdrift I Expedition to the Laptev Sea“, edited by Heidemarie Kassens and Valeriy Y. Karpiy.
- Heft Nr. 152/1994 – „Die Expedition ANTARKTIS-X mit FS ‚Polarstern‘ 1992. Bericht von den Fahrabschnitten / ANT-X / 1a und 2“, herausgegeben von Heinz Miller.
- Heft Nr. 153/1994 – „Aminosäuren und Huminstoffe im Stickstoffkreislauf polarer Meere“, von Ulrike Hubberten.
- Heft Nr. 154/1994 – „Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea“, by Claudio Richter.

- Heft Nr. 155/1995 – „Benthos in polaren Gewässern“, herausgegeben von Christian Wiencke und Wolf Arntz.
- Heft Nr. 156/1995 – „An adjoint model for the determination of the mean oceanic circulation, air-sea fluxes and mixing coefficients“, by Reiner Schlitzer.
- Heft Nr. 157/1995 – „Biochemische Untersuchungen zum Lipidstoffwechsel antarktischer Copepoden“, von Kirsten Fahl.
- * Heft Nr. 158/1995 – „Die Deutsche Polarforschung seit der Jahrhundertwende und der Einfluß Erich von Drygalskis“, von Cornelia Lüdecke.
- * Heft Nr. 159/1995 – „The distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in the Arctic Ocean: Implications for the freshwater balance of the halocline and the sources of deep and bottom waters“, by Dorothea Bauch.
- * Heft Nr. 160/1995 – „Rekonstruktion der spätquartären Tiefenwasserzirkulation und Produktivität im östlichen Südatlantik anhand von benthischen Foraminiferenvergesellschaftungen“, von Gerhard Schmiedl.
- Heft Nr. 161/1995 – „Der Einfluß von Salinität und Lichtintensität auf die Osmolytkonzentrationen, die Zellvolumina und die Wachstumsraten der antarktischen Eisdiatomeen *Chaetoceros sp.* und *Navicula sp.* unter besonderer Berücksichtigung der Aminosäure Prolin“, von Jürgen Nothnagel.
- Heft Nr. 162/1995 – „Meereistransportiertes lithogenes Feinmaterial in spätquartären Tiefseesedimenten des zentralen östlichen Arktischen Ozeans und der Framstraße“, von Thomas Letzig.
- Heft Nr. 163/1995 – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/2 mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94“, herausgegeben von Rainer Gersonde.
- Heft Nr. 164/1995 – „Regionale und altersabhängige Variation gesteinsmagnetischer Parameter in marinen Sedimenten der Arktis“, von Thomas Frederichs.
- Heft Nr. 165/1995 – „Vorkommen, Verteilung und Umsatz biogener organischer Spurenstoffe: Sterole in antarktischen Gewässern“, von Georg Hanke.
- Heft Nr. 166/1995 – „Vergleichende Untersuchungen eines optimierten dynamisch-thermodynamischen Meereismodells mit Beobachtungen im Weddellmeer“, von Holger Fischer.
- * Heft Nr. 167/1995 – „Rekonstruktionen von Paläo-Umweltparametern anhand von stabilen Isotopen und Faunen-Vergesellschaftungen planktischer Foraminiferen im Südatlantik“, von Hans-Stefan Niebler.
- Heft Nr. 168/1995 – „Die Expedition ANTARKTIS XII mit FS ‚Polarstern‘ 1993/94. Bericht von den Fahrtabschnitten ANT XII/1 und 2“, herausgegeben von Gerhard Kattner und Dieter Karl Fütterer.
- Heft Nr. 169/1995 – „Medizinische Untersuchung zur Circadianrhythmik und zum Verhalten bei Überwinterern auf einer antarktischen Forschungsstation“, von Hans Wortmann.
- Heft-Nr. 170/1995 – DFG-Kolloquium: Terrestrische Geowissenschaften – Geologie und Geophysik der Antarktis.
- Heft Nr. 171/1995 – „Strukturentwicklung und Petrogenese des metamorphen Grundgebirges der nördlichen Heimfrontfjella (westliches Dronning Maud Land/Antarktika)“, von Wilfried Bauer.
- Heft Nr. 172/1995 – „Die Struktur der Erdkruste im Bereich des Scoresby Sund, Ostgrönland: Ergebnisse refraktionseismischer und gravimetrischer Untersuchungen“, von Holger Mandler.
- Heft Nr. 173/1995 – „Paläozoische Akkretion am paläopazifischen Kontinentalrand der Antarktis in Nordvictorialand – P-T-D-Geschichte und Deformationsmechanismen im Bowers Terrane“, von Stefan Matzer.
- Heft Nr. 174/1995 – „The Expedition ARKTIS-X/2 of RV ‚Polarstern‘ in 1994“, edited by Hans-W. Hubberten.
- Heft Nr. 175/1995 – „Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1994“, edited by Christine Siegert and Gmity Bolshiyarov.
- * Heft Nr. 176/1995 – „Russian-German Cooperation: Laptev Sea System“, edited by Heidemarie Kassens, Dieter Piepenburg, Jörn Thiede, Leonid Timokhov, Hans-Wolfgang Hubberten and Sergey M. Priamikov.
- Heft Nr. 177/1995 – „Organischer Kohlenstoff in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans: Terrigener Eintrag und marine Produktivität“, von Carsten J. Schubert.
- Heft Nr. 178/1995 – „Cruise ANTARKTIS XII/4 of RV ‚Polarstern‘ in 1995: CTD-Report“, by Jüri Sildam.
- Heft Nr. 179/1995 – „Benthische Foraminiferenfaunen als Wassermassen-, Produktions- und Eisdriftanzeiger im Arktischen Ozean“, von Jutta Wollenburg.
- Heft Nr. 180/1995 – „Biogenopal und biogenes Barium als Indikatoren für spätquartäre Produktivitätsänderungen am antarktischen Kontinentalhang, atlantischer Sektor“, von Wolfgang J. Bonn.
- Heft Nr. 181/1995 – „Die Expedition ARKTIS X/1 des Forschungsschiffes ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Eberhard Fährbach.
- Heft Nr. 182/1995 – „Laptev Sea System: Expeditions in 1994“, edited by Heidemarie Kassens.
- Heft Nr. 183/1996 – „Interpretation digitaler Parasound Echolotaufzeichnungen im östlichen Arktischen Ozean auf der Grundlage physikalischer Sedimenteigenschaften“, von Uwe Bergmann.
- Heft Nr. 184/1996 – „Distribution and dynamics of inorganic nitrogen compounds in the troposphere of continental, coastal, marine and Arctic areas“, by Maria Dolores Andrés Hernández.
- Heft Nr. 185/1996 – „Verbreitung und Lebensweise der Aphroditen und Polynoiden (Polychaeta) im östlichen Weddellmeer und im Lazarevmeer (Antarktis)“, von Michael Stiller.
- Heft Nr. 186/1996 – „Reconstruction of Late Quaternary environmental conditions applying the natural radionuclides ^{230}Th , ^{10}Be , ^{234}Pa and ^{238}U : A study of deep-sea sediments from the eastern sector of the Antarctic Circumpolar Current System“, by Martin Frank.
- Heft Nr. 187/1996 – „The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994“, by Gert König-Langlo and Andreas Herber.
- Heft Nr. 188/1996 – „Die Expedition ANTARKTIS-XI/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1994“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe.
- Heft Nr. 189/1996 – „Die Expedition ARKTIS-VII/3 mit FS ‚Polarstern‘ 1990“, herausgegeben von Heinz Miller und Hannes Grobe.

Heft Nr. 190/1996 – "Cruise report of the Joint Chilean-German-Italian Magellan 'Victor Hensen' Campaign in 1994", edited by Wolf Arntz and Matthias Gorny.

Heft Nr. 191/1996 – „Leitfähigkeits- und Dichtemessung an Eisbohrkernen“, von Frank Wilhelms.

Heft Nr. 192/1996 – „Photosynthese-Charakteristika und Lebensstrategie antarktischer Makroalgen“, von Gabriele Weykam.

Heft Nr. 193/1996 – „Heterogene Reaktionen von N_2O_5 und Hbr und ihr Einfluß auf den Ozonabbau in der polaren Stratosphäre“, von Sabine Seisel.

Heft Nr. 194/1996 – „Ökologie und Populationsdynamik antarktischer Ophiuroiden (Echinodermata)“, von Corinna Dahm.

Heft Nr. 195/1996 – „Die planktische Foraminifere *Neoglobobulimina pachyderma* (Ehrenberg) im Weddellmeer, Antarktis“, von Doris Berberich.

Heft Nr. 196/1996 – „Untersuchungen zum Beitrag chemischer und dynamischer Prozesse zur Variabilität des stratosphärischen Ozons über der Arktis“, von Birgit Heese.

Heft Nr. 197/1996 – "The Expedition ARKTIS-XI/2 of 'Polarstern' in 1995", edited by Gunther Krause.

Heft Nr. 198/1996 – „Geodynamik des Westantarktischen Riftsystems basierend auf Apatit-Spaltspuranalysen“, von Frank Lisker.

Heft Nr. 199/1996 – "The 1993 Northeast Water Expedition. Data Report on CTD Measurements of RV 'Polarstern' Cruises ARKTIS IX/2 and 3", by Gerion Budéus and Wolfgang Schneider.

Heft Nr. 200/1996 – "Stability of the Thermohaline Circulation in analytical and numerical models", by Gerrit Lohmann.

Heft Nr. 201/1996 – „Trophische Beziehungen zwischen Makroalgen und Herbivoren in der Potter Cove (King George-Insel, Antarktis)“, von Katrin Iken.

Heft Nr. 202/1996 – „Zur Verbreitung und Respiration ökologisch wichtiger Bodentiere in den Gewässern um Svalbard (Arktis)“, von Michael K. Schmid.

• Heft Nr. 203/1996 – „Dynamik, Rauigkeit und Alter des Meereises in der Arktis – Numerische Untersuchungen mit einem großskaligen Modell“, von Markus Harder.

Heft Nr. 204/1996 – „Zur Parametrisierung der stabilen atmosphärischen Grenzschicht über einem antarktischen Schelfeis“, von Dörthe Handorf.

Heft Nr. 205/1996 – "Textures and fabrics in the GRIP ice core, in relation to climate history and ice deformation", by Thorsteinn Thorsteinsson.

Heft Nr. 206/1996 – „Der Ozean als Teil des gekoppelten Klimasystems: Versuch der Rekonstruktion der glazialen Zirkulation mit verschiedenen komplexen Atmosphärenkomponenten“, von Kerstin Fieg.

Heft Nr. 207/1996 – „Lebensstrategien dominanter antarktischer Oithonidae (Cyclopoida, Copepoda) und Oncaeidae (Poecilostomatoida, Copepoda) im Bellingshausenmeer“, von Cornelia Metz.

Heft Nr. 208/1996 – „Atmosphäreneinfluß bei der Fernerkundung von Meereis mit passiven Mikrowellenradiometern“, von Christoph Oelke.

Heft Nr. 209/1996 – „Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von Line-Scanner-Messungen“, von Axel Bochert.

Heft Nr. 210/1996 – „Die mit ausgewählten Schwämmen (Hexactinellida und Demospongiae) aus dem Weddellmeer, Antarktis, vergesellschaftete Fauna“, von Kathrin Kunzmann.

Heft Nr. 211/1996 – "Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR 1995 and the Expedition KOLYMA 1995", by Dima Yu. Bolshiyakov and Hans-W. Hubberten.

Heft Nr. 212/1996 – "Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin", by Ruediger Stein, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Kirsten Fahl.

Heft Nr. 213/1996 – „Gonadenentwicklung und Eiproduktion dreier *Calanus*-Arten (Copepoda): Freilandbeobachtungen, Histologie und Experimente“, von Barbara Niehoff.

Heft Nr. 214/1996 – „Numerische Modellierung der Übergangszone zwischen Eisschild und Eisschelf“, von Christoph Mayer.

Heft Nr. 215/1996 – „Arbeiten der AWI-Forschungsstelle Potsdam in Antarktika, 1994/95“, herausgegeben von Ulrich Wand.

Heft Nr. 216/1996 – „Rekonstruktion quartärer Klimaänderungen im atlantischen Sektor des Südpolarmees anhand von Radiolarien“, von Uta Brathauer.

Heft Nr. 217/1996 – „Adaptive Semi-Lagrange-Finite-Elemente-Methode zur Lösung der Flachwassergleichungen: Implementierung und Parallelisierung“, von Jörn Behrens.

Heft Nr. 218/1997 – "Radiation and Eddy Flux Experiment 1995 (REFLEX III)", by Jörg Hartmann, Axel Bochert, Dietmar Freese, Christoph Kottmeier, Dagmar Nagel and Andreas Reuter.

Heft Nr. 219/1997 – „Die Expedition ANTARKTIS-XII mit FS 'Polarstern' 1995. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XII/3, herausgegeben von Wilfried Jokatz und Hans Oerter.

Heft Nr. 220/1997 – „Ein Beitrag zum Schwerfeld im Bereich des Weddellmeeres, Antarktis. Nutzung von Altimetermessungen des GEOSAT und ERS-1“, von Tilo Schöne.

Heft Nr. 221/1997 – „Die Expeditionen ANTARKTIS-XIII/1-2 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1995/96“, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Mike Lukas und Victor Smetacek.

Heft Nr. 222/1997 – "Tectonic Structures and Glaciomarine Sedimentation in the South-Eastern Weddell Sea from Seismic Reflection Data", by László Oszkó.

Heft Nr. 223/1997 – „Bestimmung der Meereisdicke mit seismischen und elektromagnetisch-induktiven Verfahren“, von Christian Haas.

Heft Nr. 224/1997 – „Troposphärische Ozonvariationen in Polarregionen“, von Silke Wessel.

Heft Nr. 225/1997 – „Biologische und ökologische Untersuchungen zur kryptopelagischen Amphipodenfauna des arktischen Meereises“, von Michael Pottermann.

Heft Nr. 226/1997 – “Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of RV ‘Polarstern’ in 1995”, edited by Eike Rachev.

Heft Nr. 227/1997 – „Der Einfluß kompatibler Substanzen und Kryoprotektoren auf die Enzyme Malatdehydrogenase (MDH) und Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase (G6P-DH) aus *Acrosiphonia arctica* (Chlorophyta) der Arktis“, von Katharina Kück.

Heft Nr. 228/1997 – „Die Verbreitung epibenthischer Mollusken im chilenischen Beagle-Kanal“, von Katrin Linse.

Heft Nr. 229/1997 – „Das Mesozooplankton im Laptevmeer und östlichen Nansen-Becken - Verteilung und Gemeinschaftsstrukturen im Spätsommer“, von Hinrich Hanssen.

Heft Nr. 230/1997 – „Modell eines adaptierbaren, rechnergestützten, wissenschaftlichen Arbeitsplatzes am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung“, von Lutz-Peter Kurdelski.

Heft Nr. 231/1997 – „Zur Ökologie arktischer und antarktischer Fische: Aktivität, Sinnesleistungen und Verhalten“, von Christopher Zimmermann.

Heft Nr. 232/1997 – „Persistente chlororganische Verbindungen in hochantarktischen Fischen“, von Stephan Zimmermann.

Heft Nr. 233/1997 – „Zur Ökologie des Dimethylsulfoniumpropionat (DMSP)-Gehaltes temperierter und polarer Phytoplanktongemeinschaften im Vergleich mit Laborkulturen der Coccolithophoride *Emiliania huxleyi* und der antarktischen Diatomee *Nitzschia lecontei*“, von Doris Meyerdieters.

Heft Nr. 234/1997 – „Die Expedition ARCTIC ‘96 des FS ‘Polarstern’ (ARK XIII) mit der Arctic Climate System Study (ACSYS)“, von Ernst Augstein und den Fahrtteilnehmern.

Heft Nr. 235/1997 – „Polonium-210 und Blei-210 im Südpolarmeer: Natürliche Tracer für biologische und hydrographische Prozesse im Oberflächenwasser des Antarktischen Zirkumpolarstroms und des Weddellmeeres“, von Jana Friedrich.

Heft Nr. 236/1997 – “Determination of atmospheric trace gas amounts and corresponding natural isotopic ratios by means of ground-based FTIR spectroscopy in the high Arctic“, by Arndt Meier.

Heft Nr. 237/1997 – “Russian-German Cooperation: The Expedition TAYMYR/SEVERNAYA ZEMLYA 1996“, edited by Martin Melles, Birgit Hagedorn und Dmitri Yu. Bolshiyarov.

Heft Nr. 238/1997 – “Life strategy and ecophysiology of Antarctic macroalgae“, by Iván M. Gómez.

Heft Nr. 239/1997 – „Die Expedition ANTARKTIS XIII/4-5 des Forschungsschiffes ‘Polarstern’ 1996“, herausgegeben von Eberhard Fährbach und Dieter Gerdes.

Heft Nr. 240/1997 – „Untersuchungen zur Chrom-Speziation in Meerwasser, Meereis und Schnee aus ausgewählten Gebieten der Arktis“, von Heide Giese.

Heft Nr. 241/1997 – “Late Quaternary glacial history and paleoceanographic reconstructions along the East Greenland continental margin: Evidence from high-resolution records of stable isotopes and ice-rafted debris“, by Seung-II Nam.

Heft Nr. 242/1997 – “Thermal, hydrological and geochemical dynamics of the active layer at a continuous permafrost site, Taymyr Peninsula, Siberia“, by Julia Boike.

Heft Nr. 243/1997 – „Zur Paläoozeanographie hoher Breiten: Stellvertreterdaten aus Foraminiferen“, von Andreas Mackensen.

Heft Nr. 244/1997 – “The Geophysical Observatory at Neumayer Station, Antarctica, Geomagnetic and seismological observations in 1995 and 1996“, by Alfons Eckstaller, Thomas Schmidt, Viola Graw, Christian Müller and Johannes Røgenhagen.

Heft Nr. 245/1997 – „Temperaturbedarf und Biogeographie mariner Makroalgen - Anpassung mariner Makroalgen an tiefe Temperaturen“, von Bettina Bischoff-Bäsmann.

Heft Nr. 246/1997 – „Ökologische Untersuchungen zur Fauna des arktischen Meereises“, von Christine Friedrich.

Heft Nr. 247/1997 – „Entstehung und Modifizierung von marinen gelösten organischen Substanzen“, von Berit Kirchhoff.

Heft Nr. 248/1997 – “Laptev Sea System: Expeditions in 1995“, edited by Heidemarie Kassens.

Heft Nr. 249/1997 – “The Expedition ANTARKTIS XIII/3 (EASIZ I) of RV ‘Polarstern’ to the eastern Weddell Sea in 1996“, edited by Wolf Arntz and Julian Gutt.

Heft Nr. 250/1997 – „Vergleichende Untersuchungen zur Ökologie und Biodiversität des Mega-Epibenthos der Arktis und Antarktis“, von Andreas Starmans.

Heft Nr. 251/1997 – „Zeitliche und räumliche Verteilung von Mineralvergesellschaftungen in spätquartären Sedimenten des Arktischen Ozeans und ihre Nützlichkeit als Klimaindikatoren während der Glazial/Interglazial-Wechsel“, von Christoph Vogt.

Heft Nr. 252/1997 – „Solitäre Ascidien in der Potter Cove (King George Island, Antarktis). Ihre ökologische Bedeutung und Populationsdynamik“, von Stephan Kühne.

Heft Nr. 253/1997 – “Distribution and role of microprotozoa in the Southern Ocean“, by Christine Klaas.

Heft Nr. 254/1997 – „Die spätquartäre Klima- und Umweltgeschichte der Burger-Oase, Ostantarktis“, von Thomas Kulbe.

- Heft Nr. 255/1997** – "Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/2 of RV 'Polarstern' in 1997", edited by Ruediger Stein and Kirsten Fahl.
- Heft Nr. 256/1998** – „Das Radionuklid Tritium im Ozean: Meßverfahren und Verteilung von Tritium im Südatlantik und im Weddellmeer“, von Jürgen Sültenfuß.
- Heft Nr. 257/1998** – „Untersuchungen der Saisonalität von atmosphärischem Dimethylsulfid in der Arktis und Antarktis“, von Christoph Kleefeld.
- Heft Nr. 258/1998** – „Bellingshausen- und Amundsenmeer: Entwicklung eines Sedimentationsmodells“, von Frank-Oliver Nitsche.
- Heft Nr. 259/1998** – "The Expedition ANTARKTIS-XIV/4 of RV 'Polarstern' in 1997", by Dieter K. Fütterer.
- Heft Nr. 260/1998** – „Die Diatomeen der Laptevsee (Arktischer Ozean): Taxonomie und biogeographische Verbreitung“, von Holger Cremer.
- Heft Nr. 261/1998** – „Die Krustenstruktur und Sedimentdecke des Eurasischen Beckens, Arktischer Ozean: Resultate aus seismischen und gravimetrischen Untersuchungen“, von Estella Weigelt.
- Heft Nr. 262/1998** – "The Expedition ARKTIS-XIII/3 of RV 'Polarstern' in 1997", by Gunther Krause.
- Heft Nr. 263/1998** – „Thermo-tektonische Entwicklung von Oates Land und der Shackleton Range (Antarktis) basierend auf Spaltspuranalysen“, von Thorsten Schäfer.
- Heft Nr. 264/1998** – „Messungen der stratosphärischen Spurengase ClO, HCl, O₃, N₂O, H₂O und OH mittels flugzeuggetragener Submillimeterwellen-Radiometrie“, von Joachim Urban.
- Heft Nr. 265/1998** – „Untersuchungen zu Massenhaushalt und Dynamik des Ronne Ice Shelves, Antarktis“, von Astrid Lambrecht.
- Heft Nr. 266/1998** – "Scientific Cruise Report of the Kara Sea Expedition of RV 'Akademic Boris Petrov' in 1997", edited by Jens Matthiessen and Oleg Stepanets.
- Heft Nr. 267/1998** – „Die Expedition ANTARKTIS-XIV mit FS ‚Polarstern‘ 1997. Bericht vom Fahrtabschnitt ANT-XIV/3“, herausgegeben von Wilfried Jokatz und Hans Oerter.
- Heft Nr. 268/1998** – „Numerische Modellierung der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Meereis in der arktischen Eisrandzone“, von Gerit Birnbaum.
- Heft Nr. 269/1998** – "Katabatic wind and Boundary Layer Front Experiment around Greenland (KABEG '97)", by Günther Heinemann.
- Heft Nr. 270/1998** – "Architecture and evolution of the continental crust of East Greenland from integrated geophysical studies", by Vera Schlindwein.
- Heft Nr. 271/1998** – "Winter Expedition to the Southwestern Kara Sea - Investigations on Formation and Transport of Turbid Sea-Ice", by Dirk Dethleff, Per Loewe, Dominik Weiel, Hartmut Nies, Gesa Kuhlmann, Christian Bahe and Gennady Tarasov.
- Heft Nr. 272/1998** – „FTIR-Emissionsspektroskopische Untersuchungen der arktischen Atmosphäre“, von Edo Becker.
- Heft Nr. 273/1998** – „Sedimentation und Tektonik im Gebiet des Agulhas Rückens und des Agulhas Plateaus („SETA-RAP“)“, von Gabriele Uenzelmann-Neben.
- Heft Nr. 274/1998** – "The Expedition ANTARKTIS XIV/2", by Gerhard Kattner.
- Heft Nr. 275/1998** – „Die Auswirkung der 'NorthEastWater'-Polynya auf die Sedimentation von NO-Grönland und Untersuchungen zur Paläo-Ozeanographie seit dem Mittelweichsel“, von Hanne Notholt.
- Heft Nr. 276/1998** – „Interpretation und Analyse von Potentialfelddaten im Weddellmeer, Antarktis: der Zerfall des Superkontinents Gondwana“, von Michael Studinger.
- Heft Nr. 277/1998** – „Koordiniertes Programm Antarktisforschung“. Berichtskolloquium im Rahmen des Koordinierten Programms „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“, herausgegeben von Hubert Miller.
- Heft Nr. 278/1998** – „Messung stratosphärischer Spurengase über Ny-Ålesund, Spitzbergen, mit Hilfe eines bodengebundenen Mikrowellen-Radiometers“, von Uwe Raffalski.
- Heft Nr. 279/1998** – "Arctic Paleo-River Discharge (APARD). A New Research Programme of the Arctic Ocean Science Board (AOSB)", edited by Ruediger Stein.
- Heft Nr. 280/1998** – „Fernerkundungs- und GIS-Studien in Nordostgrönland“ von Friedrich Jung-Rothenhäusler.
- Heft Nr. 281/1998** – „Rekonstruktion der Oberflächenwassermassen der östlichen Laptevsee im Holozän anhand von aquatischen Palynomorphen“, von Martina Kunz-Pirrung.
- Heft Nr. 282/1998** – "Scavenging of ²³¹Pa and ²³⁰Th in the South Atlantic: Implications for the use of the ²³¹Pa/²³⁰Th ratio as a paleoproductivity proxy", by Hans-Jürgen Walter.
- Heft Nr. 283/1998** – „Sedimente im arktischen Meereis - Eintrag, Charakterisierung und Quantifizierung“, von Frank Lindemann.
- Heft Nr. 284/1998** – „Langzeitanalyse der antarktischen Meereisbedeckung aus passiven Mikrowellendaten“, von Christian H. Thomas.
- Heft Nr. 285/1998** – „Mechanismen und Grenzen der Temperaturanpassung beim Pierwurm *Arenicola marina* (L.)“, von Angela Sommer.
- Heft Nr. 286/1998** – „Energieumsätze benthischer Filtrierer der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Jens Kowalke.
- Heft Nr. 287/1998** – "Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Research from the Barents Sea up to the Laptev Sea", edited by Eike Rachor.

Heft Nr. 288/1998 – „Alfred Wegener. Kommentiertes Verzeichnis der schriftlichen Dokumente seines Lebens und Wirkens“, von Ulrich Wutzke.

Heft Nr. 289/1998 – „Retrieval of Atmospheric Water Vapor Content in Polar Regions Using Spaceborne Microwave Radiometry“, by Jungang Miao.

Heft Nr. 290/1998 – „Strukturelle Entwicklung und Petrogenese des nördlichen Kristallingürtels der Shackleton Range, Antarktis: Proterozoische und Ross-orogene Krustendynamik am Rand des Ostantarktischen Kratons“, von Axel Brommer.

Heft Nr. 291/1998 – „Dynamik des arktischen Meereises - Validierung verschiedener Rheologieansätze für die Anwendung in Klimamodellen“, von Martin Kreyscher.

Heft Nr. 292/1998 – „Anthropogene organische Spurenstoffe im Arktischen Ozean, Untersuchungen chlorierter Biphenyle und Pestizide in der Laptevsee, technische und methodische Entwicklungen zur Probenahme in der Arktis und zur Spurenstoffanalyse“, von Sven Utschakowski.

Heft Nr. 293/1998 – „Rekonstruktion der spätquartären Klima- und Umweltgeschichte der Schirmacher Oase und des Wohlthat Massivs (Ostantarktika)“, von Markus Julius Schwab.

Heft Nr. 294/1998 – „Besiedlungsmuster der benthischen Makrofauna auf dem ostgrönländischen Kontinentalhang“, von Klaus Schnack.

Heft Nr. 295/1998 – „Gehäuseuntersuchungen an planktischen Foraminiferen hoher Breiten: Hinweise auf Umweltveränderungen während der letzten 140.000 Jahre“, von Harald Hommers.

Heft Nr. 296/1998 – „Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XIII/1 of RV 'Polarstern' in 1997“, edited by Michael Spindler, Wilhelm Hagen and Dorothea Stübing.

Heft Nr. 297/1998 – „Radiometrische Messungen im arktischen Ozean - Vergleich von Theorie und Experiment“, von Klaus-Peter Johnsen.

Heft Nr. 298/1998 – „Patterns and Controls of CO₂ Fluxes in Wet Tundra Types of the Taimyr Peninsula, Siberia - the Contribution of Soils and Mosses“, by Martin Sommerkorn.

Heft Nr. 299/1998 – „The Potter Cove coastal ecosystem, Antarctica. Synopsis of research performed within the frame of the Argentinean-German Cooperation at the Dallmann Laboratory and Jubany Station (King George Island, Antarctica, 1991 - 1997)“, by Christian Wiencke, Gustavo Ferreyra, Wolf Arntz & Carlos Rinaldi.

Heft Nr. 300/1999 – „The Kara Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' 1997: First Results of a Joint Russian-German Pilot Study“, edited by Jens Matthiessen, Oleg V. Stepanets, Ruediger Stein, Dieter K. Fütterer, and Eric M. Galimov.

Heft Nr. 301/1999 – „The Expedition ANTARKTIS XV/3 (EASIZ II)“, edited by Wolf E. Arntz and Julian Gutt.

Heft Nr. 302/1999 – „Sterole im herbstlichen Weddellmeer (Antarktis): Großräumige Verteilung, Vorkommen und Umsatz“, von Anneke Mühlebach.

Heft Nr. 303/1999 – „Polare stratosphärische Wolken: Lidar-Beobachtungen, Charakterisierung von Entstehung und Entwicklung“, von Jens Biele.

Heft Nr. 304/1999 – „Spätquartäre Paläoumweltbedingungen am nördlichen Kontinentalrand der Barents- und Kara-See. Eine Multi-Parameter-Analyse“, von Jochen Knies.

Heft Nr. 305/1999 – „Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study (ARTIST)“, by Jörg Hartmann, Frank Albers, Stefania Argentini, Axel Bochert, Ubaldo Bonafé, Wolfgang Cohrs, Alessandro Conidi, Dietmar Freese, Teodoro Georgiadis, Alessandro Ippoliti, Lars Kaleschke, Christof Lüpkes, Uwe Maixner, Giangiuseppe Mastrantonio, Fabrizio Ravegnani, Andreas Reuter, Giuliano Trivellone and Angelo Viola.

Heft Nr. 306/1999 – „German-Russian Cooperation: Biogeographic and biostratigraphic investigations on selected sediment cores from the Eurasian continental margin and marginal seas to analyze the Late Quaternary climatic variability“, edited by Robert R. Spielhagen, Max S. Barash, Gennady I. Ivanov, and Jörn Thiede.

Heft Nr. 307/1999 – „Struktur und Kohlenstoffbedarf des Makrobenthos am Kontinentalhang Ostgrönlands“, von Dan Seiler.

Heft Nr. 308/1999 – „ARCTIC '98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV 'Polarstern' in 1998“, edited by Wilfried Jokat.

Heft Nr. 309/1999 – „Variabilität der arktischen Ozonschicht: Analyse und Interpretation bodengebundener Millimeterwellenmessungen“, von Björn-Martin Sinnhuber.

Heft Nr. 310/1999 – „Rekonstruktion von Meereisdrift und terrigenem Sedimenteintrag im Spätquartär: Schwermineralassoziationen in Sedimenten des Laptev-See-Kontinentalrandes und des zentralen Arktischen Ozeans“, von Marion Behrends.

Heft Nr. 311/1999 – „Parameterisierung atmosphärischer Grenzschichtprozesse in einem regionalen Klimamodell der Arktis“, von Christoph Abegg.

Heft Nr. 312/1999 – „Solare und terrestrische Strahlungswechselwirkung zwischen arktischen Eisflächen und Wolken“, von Dietmar Freese.

Heft Nr. 313/1999 – „Snow accumulation on Ekströmsen, Antarctica“, by Elisabeth Schlosser, Hans Oerter and Wolfgang Graf.

Heft Nr. 314/1999 – „Die Expedition ANTARKTIS XV/4 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.

Heft Nr. 315/1999 – „Expeditions in Siberia in 1998“, edited by Volker Rachold.

Heft Nr. 316/1999 – „Die postglaziale Sedimentationsgeschichte der Laptevsee: schwermineralogische und sedimentpetrographische Untersuchungen“, von Bernhard Peregovich.

Heft-Nr. 317/1999 – „Adaption an niedrige Temperaturen: Lipide in Eisdiatomeen“, von Heidi Lehmal.

Heft-Nr. 318/1999 – „Effiziente parallele Lösungsverfahren für elliptische partielle Differentialgleichungen in der numerischen Ozeanmodellierung“, von Natalja Rakowsky.

Heft-Nr. 319/1999 – „The Ecology of Arctic Deep-Sea Copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their Distribution, Trophodynamics and Effect on the Carbon Flux“, by Holger Auel.

Heft-Nr. 320/1999 – „Modellstudien zur arktischen stratosphärischen Chemie im Vergleich mit Meßdaten“, von Veronika Eyring.

Heft-Nr. 321/1999 – „Analyse der optischen Eigenschaften des arktischen Aerosols“, von Dagmar Nagel.

Heft-Nr. 322/1999 – „Messungen des arktischen stratosphärischen Ozons: Vergleich der Ozonmessungen in Ny-Ålesund, Spitzbergen, 1997 und 1998“, von Jens Langer.

Heft-Nr. 323/1999 – „Untersuchung struktureller Elemente des südöstlichen Weddellmeeres / Antarktis auf der Basis mariner Potentialfelddaten“, von Uwe F. Meyer.

Heft-Nr. 324/1999 – „Geochemische Verwitterungstrends eines basaltischen Ausgangsgesteins nach dem spätpleistozänen Gletscherrückzug auf der Taimyrhalbinsel (Zentralsibirien) - Rekonstruktion an einer sedimentären Abfolge des Lama Sees“, von Stefanie K. Harwart.

Heft-Nr. 325/1999 – „Untersuchungen zur Hydrologie des arktischen Meereises - Konsequenzen für den kleinskaligen Stofftransport“, von Johannes Freitag.

Heft-Nr. 326/1999 – „Die Expedition ANTARKTIS XIV/2 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1998“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach.

Heft-Nr. 327/1999 – „Gemeinschaftsanalytische Untersuchungen der Harpacticoidenfauna der Magellanregion, sowie erste similaritätsanalytische Vergleiche mit Assoziationen aus der Antarktis“, von Kai Horst George.

Heft-Nr. 328/1999 – „Rekonstruktion der Paläo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen“, von Claudia Müller.

Heft-Nr. 329/1999 – „Räumliche und zeitliche Variationen atmosphärischer Spurengase aus bodengebundenen Messungen mit Hilfe eines Michelson Interferometers“, von Justus Notholt.

Heft-Nr. 330/1999 – „The 1998 Danish-German Excursion to Disko Island, West Greenland“, edited by Angelika Brandt, Helge A. Thomsen, Henning Heide-Jørgensen, Reinhardt M. Kristensen and Hilke Ruhberg.

Heft-Nr. 331/1999 – „Poseidon“ Cruise No. 243 (Reykjavik - Greenland - Reykjavik, 24 August - 11 September 1998): Climate change and the Viking-age fjord environment of the Eastern Settlement, sw Greenland“, by Gerd Hoffmann, Antoon Kuijpers, and Jörn Thiede.

Heft-Nr. 332/1999 – „Modeling of marine biogeochemical cycles with an emphasis on vertical particle fluxes“, by Regina Usbeck.

Heft-Nr. 333/1999 – „Die Tanaidaceenfauna des Beagle-Kanals und ihre Beziehungen zur Fauna des antarktischen Festlandssockels“, von Anja Schmidt.

Heft-Nr. 334/1999 – „D-Aminosäuren als Tracer für biogeochemische Prozesse im Fluß-Schelf-Ozean-System der Arktis“, von Hans Peter Fitznar.

Heft-Nr. 335/1999 – „Ökophysiologische Ursachen der limitierten Verbreitung repteranter decapoder Krebse in der Antarktis“, von Markus Frederich.

Heft-Nr. 336/1999 – „Ergebnisse der Untersuchung des grönländischen Inlandeises mit dem elektromagnetischen Reflexionsverfahren in der Umgebung von NGRIP“, von Fidan Göktas.

Heft-Nr. 337/1999 – „Paleozoic and mesozoic tectono-thermal history of central Dronning Maud Land, East Antarctica, – evidence from fission-track thermochronology“, by Stefanie Meier.

Heft-Nr. 338/1999 – „Probleme hoher Stoffwechselraten bei Cephalopoden aus verschiedenen geographischen Breiten“, von Susanne Zielinski.

Heft-Nr. 339/1999 – „The Expedition ARKTIS XV/1“, edited by Gunther Krause.

Heft-Nr. 340/1999 – „Microbial Properties and Habitats of Permafrost Soils on Taimyr Peninsula, Central Siberia“, by Nicolé Schmidt.

Heft-Nr. 341/1999 – „Photoacclimation of phytoplankton in different biogeochemical provinces of the Southern Ocean and its significance for estimating primary production“, by Astrid Bracher.

Heft-Nr. 342/1999 – „Modern and Late Quaternary Depositional Environment of the St. Anna Trough Area, Northern Kara Sea“, edited by Ruediger Stein, Kirsten Fahl, Gennadij I. Ivanov, Michael A. Levitan, and Gennady Tarasov.

Heft-Nr. 343/1999 – „ESF-IMPACT Workshop/Oceanic impacts: mechanisms and environmental perturbations, 15 - 17 April 1999 in Bremerhaven“, edited by Rainer Gersonde and Alexander Deutsch.

Heft-Nr. 344/1999 – „Die Klimageschichte der hohen nördlichen Breiten seit dem mittleren Miozän: Hinweise aus sedimentologischen- und mineralogischen Analysen (OPD Leg 151, zentrale Framstraße)“, von Amelie Winkler.

Heft-Nr. 345/1999 – „Kurzfristige Klimaschwankungen im Scotiameer und Ergebnisse zur Kalbungsgeschichte der Antarktis während der letzten 200 000 Jahre“, von Annette Hofmann.

Heft-Nr. 346/2000 – „Glazialmarine Sedimentationsentwicklung am westantarktischen Kontinentalrand im Amundsen- und Bellingshausermeer - Hinweise auf Paläumweltveränderungen während der quartären Klimazyklen“, von Claus-Dieter Hillenbrand.

Heft-Nr. 347/2000 – „Zur Ökologie des Phytoplanktons im arktischen Laptevmeer - ein jahreszeitlicher Vergleich“, von Kirsten Tuschling.

Heft-Nr. 348/2000 – „Untersuchungen zum Fettstoffwechsel des Südlichen See-Elefanten (*Mirounga leonina* L.) in der Antarktis“, von Sven Ramdohr.

Heft-Nr. 349/2000 – „Licht- und Temperatureinfluß auf den enzymatischen Oxidationsschutz der antarktischen Eisdiatomee *Entomoneis kufferathii* Manguin“, von Raimund Schriek.

Heft-Nr. 350/2000 – „Die Expedition ARKTIS XV/3 des Forschungsschiffes 'Polarstern' 1999" herausgegeben von Ursula Schauer.

Heft-Nr. 351/2000 – „Dissolution kinetics of biogenic silica in marine environments", by Dirk Rickert.

Heft-Nr. 352/2000 – „Geometrie und Kinematik des tertiären Deckenbaus im West Spitzbergen Falten- und Überschiebungsgürtel, Brøggerhalvøya, Svalbard", von Kerstin Saalmann.

Heft-Nr. 353/2000 – „Zur Ökologie der Benthos-Foraminiferen der Potter Cove (King George Island, Antarktis)", von Michaela Mayer.

Heft-Nr. 354/2000 – „Expeditions in Siberia in 1999", edited by Volker Rachold.

Heft-Nr. 355/2000 – „Temperaturrekonstruktion im Tropischen Atlantik für das Letzte Glaziale Maximum: CLIMAP neu betrachtet.", von Carsten Porthun.

Heft-Nr. 356/2000 – „Niederfrequente Variabilität großräumiger atmosphärischer Zirkulationsstrukturen in spektralen Modellen niedriger Ordnung", von Antje Weisheimer.

Heft-Nr. 357/2000 – „Late Quaternary paleoclimatic reconstructions along the Eurasian continental margin", by Hans Peter Kleiber.

Heft-Nr. 358/2000 – „Holocene environmental history of East Greenland - evidence from lake sediments", by Bernd Wagner.

Heft-Nr. 359/2000 – „Scientific Cooperation in the Russian Arctic: Ecology of the White Sea with Emphasis on its Deep Basin", edited by Eike Rachor.

Heft-Nr. 360/2000 – „Scientific Cruise Report of the Joint Russian-German Kara-Sea Expedition of RV 'Akademik Boris Petrov' in 1999", edited by Ruediger Stein and Oleg Stepanets.

Heft-Nr. 361/2000 – „Planktic foraminifer ecology and stable isotope geochemistry in the Arctic Ocean: implications from water column and sediment surface studies for quantitative reconstructions of oceanic parameters" by Renate Volkmann.

Heft-Nr. 362/2000 – „Eisbohrkernuntersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität von Temperatur und Niederschlagsrate im Spätholozän in Nordgrönland", von Matthias Schwager.

Heft-Nr. 363/2000 – „Benthische Peracarida (Crustacea, Malacostraca) des arktischen Mellemfjordes, West-Grönland", von Anne-Nina Lörz.

Heft-Nr. 364/2000 – Die Expeditionen ANTARKTIS XVI / 3-4 des Forschungsschiffes „POLARSTERN" 1999, herausgegeben von Ulrich Bathmann, Victor Smetacek und Manfred Reinke.

Heft-Nr. 365/2000 – „Organic carbon in Late Quaternary sediments: Responses to paleoenvironmental changes in the Laptev and Kara seas (Arctic Ocean)" by Bettina Boucsein.

Heft-Nr. 366/2000 – „Flugzeuggestützte Topographie- und Schweremessung: Meßsystem und Anwendung auf die Region Framstraße, Spitzbergen und Nordostgrönland", von Tobias Boebel.

Heft-Nr. 367/2000 – „Messung dielektrischer Eigenschaften polarer Eiskerne", von Frank Wilhelms.

Heft-Nr. 368/2000 – „The Expedition ARKTIS-XV/2 of RV 'Polarstern' in 1999", edited by Wilfried Jokat.

Heft-Nr. 369/2000 – „Interpretation seismischer und gravimetrischer Daten des Weddellmeeres, Antarktis", von Johannes Rogenhagen.

Heft-Nr. 370/2000 – „Struktureigenschaften und Nahrungsbedarf der Zoobenthosgemeinschaften im Bereich des Lomonossowrückens im Arktischen Ozean", von Hendrik Deubel.

Heft-Nr. 371/2000 – „Die Rolle der Schneebedeckung für die Kryptogamen-Vegetation in der maritimen Antarktis (Potter-Halbinsel, King George Island)", von Jana Barbro Winkler.

Heft-Nr. 372/2000 – „Biodiversity of the Weddell Sea: macrozoobenthic species (demersal fish included) sampled during the expedition ANT XIII/3 (EASIZ I) with RV 'Polarstern'", edited by Julian Gutt, Boris I. Sirenko, Wolf E. Arntz, Igor S. Smirnov, and Claude De Broyer.

Heft-Nr. 373/2000 – „Benthische Foraminiferen im Boreas-Becken, Grönlandsee: Verbreitung und paläo-ozeanographische Rekonstruktionen für die letzten 450.000 Jahre", von Sabine Magnus.

Heft-Nr. 374/2000 – „Scherwellendoppelbrechungsanalyse von Registrierungen der Stationen des seismologischen Netzwerkes an der Neumayer Station, Antarktis: Seismische Anisotropie und die tektonische Entwicklung des Kontinentalrandes Queen Maud Lands", von Christian Müller.

Heft-Nr. 375/2000 – „Effects of enhanced UV-radiation on photosynthesis of Arctic/cold-temperate macroalgae", by Kai Bischof.

Heft-Nr. 376/2000 – „Saisonalität und kurzperiodische Variabilität des Seesalz-Aerosols und des bodennahen Ozons in der Antarktis (Neumayer-Station) unter Berücksichtigung der Meereisbedeckung", von Jörg Hofmann.

**Ab dem Heft-Nr. 377 erscheint die Reihe unter dem Namen:
„Berichte zur Polar- und Meeresforschung“**

Heft-Nr. 377/2000 – „Rekrutierungsmuster ausgewählter Wattfauna nach unterschiedlich strengen Wintern" von Matthias Strasser

Heft-Nr. 378/2001 – „Der Transport von Wärme, Wasser und Salz in den Arktischen Ozean", von Boris Cisewski

Heft-Nr. 379/2001 – „Analyse hydrographischer Schnitte mit Satellitenaltimetrie", von Martin Losch

Heft-Nr. 380/2001 – „Die Expeditionen ANTARKTIS XI/1-2 des Forschungsschiffes POLARSTERN 1998/1999“, herausgegeben von Eberhard Fahrbach und Saad El Naggar.

Heft-Nr. 381/2001 – „UV-Schutz- und Reparaturmechanismen bei antarktischen Diatomeen und *Phaeocystis antarctica*“, von Lieselotte Riegger.

Heft-Nr. 382/2001 – „Age determination in poalr Crustacea using the autofluorescent pigment lipofuscin“, by Bodil Bluhm.

Heft-Nr. 383/2001 – „Zeitliche und räumliche Verteilung, Habitatspräferenzen und Populationsdynamik benthischer Copepoda Harpacticoida in der Potter Cove (King George Island, Antarktis)“, von Gritta Veit-Köhler.

Heft-Nr. 384/2001 – „Beiträge aus geophysikalischen Messungen in Dronning Maud Land, Antarktis, zur Auffindung eines optimalen Bohrpunktes für eine Eiskerntiefbohrung“, von Daniel Steinhage.

Heft-Nr. 385/2001 – „Actinium-227 als Tracer für Advektion und Mischung in der Tiefsee“, von Walter Geibert.

* vergiffen/out of print.

** nur noch beim Autor/only from the author.

